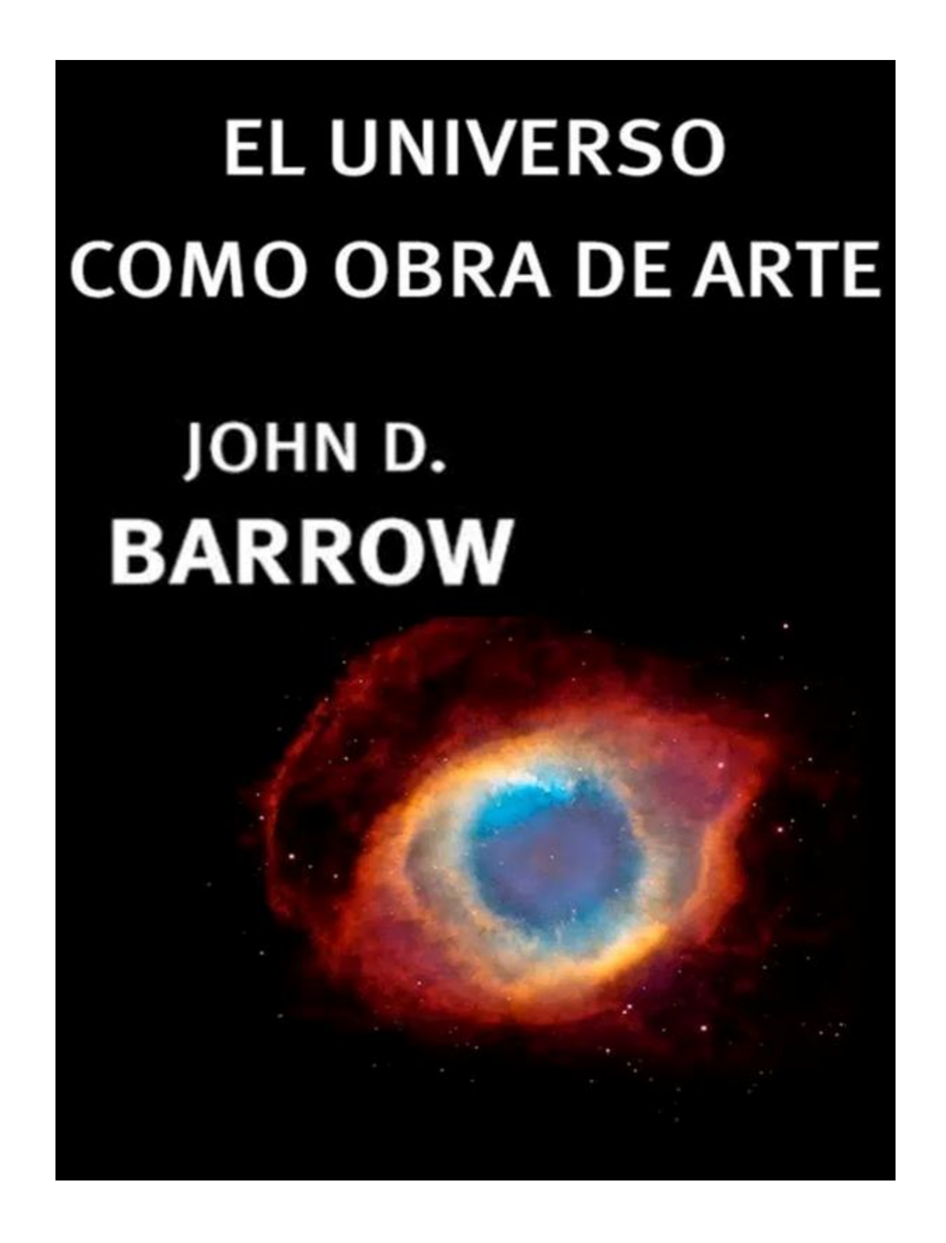

EL UNIVERSO
COMO OBRA DE ARTE
JOHN D.
BARROW

Índice

Presentación

La ciencia y el arte son actividades inequívocamente humanas, que testimonian un deseo de ver más allá de lo visible y muestran los éxitos culminantes de las perspectivas objetiva y subjetiva del mundo. Pero aunque manan de una misma fuente —la cuidadosa observación de las cosas— elaboran teorías diferentes acerca de éste: qué significa, cuáles son sus verdaderas conexiones internas. «Este libro —escribe su autor, el eminente astrofísico John D. Barrow— es un intento de examinar con ojos de científico algunas cosas que normalmente se mantienen fuera de la visión científica: aquellas que son admiradas antes que explicadas». Para ello se plantea cuestiones como por qué preferimos algunas formas particulares de arte y de música, cuáles son los orígenes de nuestro sentido de la belleza, o si la estructura de nuestra mente puede determinar qué asuntos filosóficos nos parecen estimulantes. Para responder a éstas y a otras preguntas, el autor se aventura en un territorio fascinante, misterioso y en gran parte inexplorado donde se dan cita la física, la cosmología, la cibernética, la biología evolutiva, el arte, la historia y la filosofía. La investigación de Barrow ilustra las múltiples vías a través de las cuales la estructura del universo ha modelado nuestro pensamiento y nuestro gusto estético y termina relacionando los dominios tradicionalmente separados del arte y la ciencia, y respondiendo a preguntas del tipo de cómo nuestro entorno cósmico y planetario afecta nuestra apreciación artística del paisaje, cuál es el origen de los colores naturales o de la música, un arte que tiene, como pocos, el poder de influir en nuestras emociones. Lo menos que puede decirse de esta obra es que en ella la ciencia, el arte, la antropología y la filosofía se unen en una irresistible y subyugadora combinación.

A WJT, con agradecimiento

En cierta ocasión, T. S. Eliot tomó un taxi en Londres y el taxista le dijo «Usted es T. S. Eliot». El poeta, sorprendido, le preguntó cómo lo sabía. «Oh —respondió el taxista—, tengo ojo para las celebridades. Sin ir más lejos, la otra tarde recogí a Bertrand Russell y le dije "Bien, lord Russell, ¿cómo va todo?" y, ¿sabe usted?, no supo decírmelo».

JOHN NAUGHTON

Prefacio a la primera edición

La vida, como la ciencia y el arte, es una teoría acerca del mundo: una teoría que en nuestro caso toma forma corpórea. Gracias a una serie de adaptaciones, la mayoría de las cuales son favorables y ninguna de las cuales es letal, los seres vivos han invertido en expectativas concretas sobre el curso futuro de sus entornos. Si estas teorías son suficientemente buenas, la vida crecerá y se multiplicará; pero si han quedado obsoletas por las condiciones cambiantes, sus encarnaciones disminuirán y perecerán.

La ciencia y el arte son dos cosas muy inequívocamente humanas. Testimonian un deseo de ver más allá de lo visible. Muestran los éxitos culminantes de las visiones objetiva y subjetiva del mundo. Pero aunque manan de una misma fuente —la cuidadosa observación de las cosas— elaboran teorías diferentes acerca del mundo: qué significa, cuáles son realmente sus conexiones internas y qué deberíamos juzgar importante.

La ciencia y el arte han divergido. A medida que la ciencia se hacía más acertada en su búsqueda por explicar lo visible a partir de las invisibles leyes de la Naturaleza, también el arte se hacía cada vez más subjetivo, más metafórico y más divorciado de la representación realista. Exploraba otros mundos, dejando que la ciencia tratara con éste. Pero hay más en el arte de la apreciación que la apreciación del arte. Las ciencias pueden iluminar nuestra predilección por la creación artística. Recíprocamente, la creciente fascinación de los científicos por los frutos de la complejidad organizada en todas sus formas debería llevarlos hacia las artes creativas donde existen extraordinarios ejemplos de complejidad estructurada. Este libro es un intento de examinar con ojos de científico algunas cosas que normalmente se mantienen fuera de la visión científica. Las cosas que son admiradas antes que explicadas.

El ambientalismo es el plato del mes. En consecuencia, tenemos que apreciar cómo el entorno cósmico se imprime en nuestras mentes y cuerpos para

configurar sus estructuras, sus fascinaciones y sus prejuicios. Los astrónomos han revelado que vivimos en un Universo grande y viejo, oscuro y frío; pero no podría ser de otra manera. En efecto, veremos que estos puros hechos de la vida cósmica son esenciales para que el Universo pueda albergar vida. Y de estas características que soportan la vida fluye una percepción particular del Universo que muy bien podemos compartir con todos sus perceptores, cualesquiera que puedan ser. Nos detendremos en algunas de las maneras en que la estructura del Universo influye en el modo de nuestro filosofar y sentir sobre el Universo: cuál podría ser el impacto metafórico del descubrimiento de vida extraterrestre; cómo se filtran las características inevitables de un planeta que soporta vida para influir en la estructura y el comportamiento de los seres vivos, y cómo las estrellas y el cielo, revestidos por la interpretación que les damos, han influido en nuestros conceptos de tiempo y determinismo. Estas investigaciones nos llevarán por vericuetos inesperados a considerar cómo nuestro entorno pasado ha forjado conceptos de entornos favorables que, a su vez, influyen en nuestra apreciación artística del paisaje. Esto revelará nuevas cosas sobre nuestra ambigua atracción hacia el arte generado por ordenador y nos llevará a explorar una antigua analogía del problema de si el arte por ordenador es verdaderamente arte. También veremos por qué se originan los colores naturales, y cómo han ayudado a forjar la visión del color de los seres vivos e influido en el uso simbólico del color en el arte y la sociedad modernos. Pasando de la imagen al sonido, consideraremos los orígenes de la música. La música tiene el poder de influir en las emociones humanas como no pueden hacer otras formas de complejidad organizada. En nuestras exploraciones de sus fuentes y estructura, encontraremos pruebas sugerentes de un factor común detrás de toda la música humanamente disfrutable, que la vincula a ella, y a nosotros, con la estructura general del entorno.

Los antropólogos y los científicos sociales han puesto énfasis tradicionalmente en la diversidad de las actividades artística y social humanas, pero han ignorado en general las características comunes de la existencia que derivan de la universalidad de nuestro entorno cósmico y las características necesarias que deben mostrar los entornos que soportan vida. Igual que la ciencia se ha centrado durante mucho tiempo casi exclusivamente en las regularidades y simplicidades del mundo a expensas de las irregularidades y complejidades, también nuestra contemplación de las artes se ha complacido demasiado en las diversidades e impredecibilidades de sus formas a expensas de la madeja de características compartidas que nos ligan con estas formas de complejidad al entorno subyacente que ofrece el Universo. El estudio de las acciones humanas, las mentes humanas y la creatividad humana ha sido rápido en ver la complejidad, pero lento en apreciar la simplicidad. La ciencia, creada para reflexionar sobre la simetría, ha empezado finalmente a apreciar la diversidad. En los frutos de la actividad creativa, la ciencia encontrará los ejemplos más impresionantes de complejidad organizada, mientras ofrece, a cambio, una nueva perspectiva sobre las fuentes de nuestros sentidos, nuestros gustos, y las imágenes y sonidos que los rodean.

Muchas personas han ayudado a este proyecto, directa o indirectamente, a sabiendas o sin saberlo, en diferentes etapas. Me gustaría dar las gracias a Mark Bailey, Margaret Boden, Laura Brown, Giuseppe Caglioti, Paul Davies, John Grandidge, Mike Land, John Manger, el difunto John Maynard Smith, sir William McCrea, Stephen Medcalf Jim Message, Leon Mestel, Geoff Miller, Marjorie Mueller, Andrew Murray, Cari Murray, Keith O' Nions, Mike O'Shea, Tim Roper, Robert Smith, David Streeter, Debbie Sutcliffe, el finado Roger Tayler, Frank Tipler y Tatyana Tchuvilyova.

Los miembros de la familia siempre están intrigados por los escritores, puesto que parecen ser personas para quienes escribir es más difícil que para otros. Mi mujer Elizabeth ayudó de innumerables y pacientes formas;

nuestros hijos, David, Roger y Louise, observaron con interés, expresaron escepticismo sobre el hecho de que alguien puede llamarse a sí mismo científico y no jugar con juegos de ordenador o manejar la grabadora de vídeo, y anunciaron que pronto estarían escribiendo sus propios libros.

Prefacio a la segunda edición

Me complace que la Oxford University Press quisiera publicar una nueva edición de El Universo como obra de arte *para satisfacer la continua demanda del original. Desde que la primera apareció en 1995 se han producido varios desarrollos interesantes en áreas de la ciencia y el arte que eran tratadas en la primera edición. He aprovechado la oportunidad para ampliar el libro original en muchos lugares para tener en cuenta dichos desarrollos. Estoy particularmente agradecido a Michael Rodgers, cuya idea era empezar, a Marsha Filion, cuya idea era acabar, a Latha Menos, cuya tarea era terminar, y a Roger Taylor, Paul Davies, Janna Levin, Nick Mee, Richaed Bright, Jean-Pierra Boon, Geoff West, Jayanth Banavar y Martin Kemp por las discusiones y contribuciones que ayudaron a crear lo que sucedió entre medias.*

Capítulo 1
Cuentos de lo inesperado

Los argumentos contra las ideas nuevas pasan en general por tres fases distintas: de «No es cierto» a «Bien, quizá sea cierto, pero no es importante», y finalmente «Es cierto y es importante, pero no es nuevo, siempre lo hemos sabido».

SABIDURÍA IMPOPULAR

Somos espectadores contumaces. Pasamos gran parte de nuestra vida observando cómo la gente actúa, compite, trabaja o simplemente descansa. Y nuestro interés no está confinado al espectáculo humano. También nos cautivan los «objetos»: pinturas, esculturas, fotografías de experiencias pasadas... todos tienen el poder de captar nuestra atención. Y si no podemos observar la vida real, nos vemos atraídos por los mundos virtuales del cine, la televisión y los vídeos. Incluso es posible que uno se encuentre leyendo un libro.

Mientras que algunas personas son hábiles en la creación de imágenes y sonidos interesantes, otras son observadores entrenados. Buscan imágenes inusuales o registran sucesos que la mayoría de nosotros no advertiríamos nunca. Algunos, con ayuda de sensores artificiales, profundizan mucho más y llegan mucho más lejos de lo que permiten nuestros sentidos por sí solos. De estas sensaciones ha surgido un bordado de actividades artísticas que son inequívocamente humanas. Pero, paradójicamente, de la misma fuente ha brotado un estudio sistemático de la Naturaleza al que llamamos ciencia. Sus orígenes comunes pueden sorprender a muchos, porque parece haber una gran laguna entre ciencia y arte, demarcada por nuestros prejuicios y nuestros sistemas educativos. Las ciencias pintan una explicación del mundo

impersonal y objetiva, privada deliberadamente de «significado», que nos habla de los orígenes y la mecánica de la vida, pero no revela nada de las alegrías y penas de vivir. Por el contrario, las artes creativas codifican la antítesis de la visión del mundo científico: una celebración desatada de esa subjetividad humana que nos separa de las bestias; una expresión única de la mente humana que la separa del insensible torbellino de electrones y galaxias que, según los científicos, es la trama del mundo.

Este libro es un intento de ver las cosas de forma diferente. Queremos explorar algunas de las maneras en que nos afecta nuestra experiencia común de vivir en el Universo. Desde los años sesenta del siglo pasado se ha puesto de moda el considerar todos los atributos humanos interesantes como cosas que hemos aprendido de nuestros contactos con los individuos y la sociedad —como resultados de la educación, no de la naturaleza— y a ignorar los universales del pensamiento humano. Recientemente este prejuicio ha sido seriamente cuestionado. Las cosas son mucho más complicadas. Las complejidades de nuestras mentes y cuerpos testimonian una larga historia de sutiles adaptaciones a la naturaleza del mundo y sus otros ocupantes. Los seres humanos, junto con todas sus querencias y antipatías, sus sentidos y sensibilidades, no cayeron hechos del cielo; ni nacieron con mentes y cuerpos sin huellas de la historia de sus especies. Muchas de nuestras capacidades y susceptibilidades son adaptaciones específicas a viejos problemas ambientales, más que manifestaciones independientes de una inteligencia general válida en cualquier circunstancia.

Tenemos instintos y propensiones que guardan sutil testimonio de los universales de nuestro propio entorno y el de nuestros ancestros lejanos. Algunos de estos instintos, como el del lenguaje, son tan importantes que, para cualquier fin práctico, son inalterables; otros son más maleables y pueden ser reescritos en parte, o totalmente reprogramados, por la experiencia: aparecen por defecto sólo en ausencia de influencias culturales u otras respuestas aprendidas. Algunos de estos universales ambientales se

extienden más allá de nuestro propio planeta. Reflejan las regularidades de sistemas solares, galaxias y universos enteros. Pueden decirnos cosas importantes sobre cualquier forma de inteligencia viviente —dondequiera que pudiera estar en el universo.

Desenredar todas estas hebras es una tarea imposible. Nuestros objetivos en este libro son más modestos. Vamos a examinar algunas de las formas inesperadas en que la estructura del Universo —sus leyes, sus entornos, su apariencia astronómica— deja su impronta en nuestros pensamientos, nuestras preferencias estéticas y nuestras ideas sobre la naturaleza de las cosas. En algunos casos, dichas influencias cósmicas alterarán los entornos de los seres vivos de formas inevitables; en otros, nuestras propensiones aparecerán como subproductos de adaptaciones a situaciones a las que ya no nos enfrentamos. Dichas adaptaciones siguen con nosotros, a menudo en formas metamorfoseadas, como evidencia viva de la presencia del pasado.

Siempre ha habido una división entre quienes ven la ciencia como el descubrimiento de cosas reales y los que la consideran una elaborada creación mental diseñada para dar sentido a una realidad incognoscible. El primer punto de vista es atractivo para los científicos porque les hace sentirse bien con lo que están haciendo: explorar territorio desconocido y desenterrar nuevos hechos sobre la realidad. El segundo punto de vista es adoptado más fácilmente por quienes están implicados en el estudio del comportamiento humano. Sociólogos y psicólogos están tan impresionados por la inventiva de la mente humana, y por las actividades humanas colectivas de los científicos, que piensan que esto es todo lo que hay. Pero, aunque la ciencia encarna ciertamente esos elementos humanos, es un salto lógico injustificado concluir que no hay otra cosa que dichos elementos humanos. Este énfasis en la ciencia como tan sólo otra actividad humana, más que un proceso que implica descubrimiento, puede ser una manifestación sutil de oposición a la empresa científica pues degrada el

estatus de su actividad. Después de todo, los jardineros no parecen tan excitantes como los exploradores.

Cualesquiera que sean las virtudes de estas afirmaciones y contraafirmaciones, hay indudablemente un dilema para el profano. ¿Son las ciencias y las humanidades respuestas alternativas al mundo en que vivimos? ¿Son irreconciliables? ¿Debemos abrazar lo subjetivo o lo objetivo: el ábaco o la rosa? ¿O hemos creado una falsa dicotomía y las dos visiones del mundo están más íntimamente entrelazadas de lo que parece a primera vista?

Uno de nuestros objetivos es iluminar la relación entre las ciencias y las artes con una nueva perspectiva de nuestra emergencia en el Universo. El hecho de que hayamos evolucionado en un tipo de Universo concreto pone restricciones insospechadas a lo que pensamos y cómo pensamos. ¿Qué juegos y rompecabezas encontramos desafiantes? ¿Por qué nos gustan ciertos tipos de arte o de música? ¿Por qué tenemos una propensión a ver pautas donde no existe ninguna? ¿Por qué tantos mitos y leyendas tienen factores comunes? ¿Cómo están estas cosas influenciadas por nuestra experiencia del tiempo y el espacio, y por la apariencia de los cielos? ¿Cuál es la influencia de nuestro tiempo de vida característico —ni muy corto, ni muy largo— sobre nuestro pensamiento acerca del mundo y el valor que damos a la vida? ¿Cómo determina la estructura de nuestra mente los problemas filosóficos que encontramos desafiantes? ¿Por qué hay algunas imágenes tan atractivas al ojo humano? ¿Cómo han influido los conceptos de azar y aleatoriedad en nuestro pensamiento ético y religioso? ¿Cuáles son las fuentes del fatalismo y de nuestras ideas sobre el fin del mundo? Si entráramos en contacto con civilizaciones extraterrestres ¿a qué podrían parecerse? ¿Qué podríamos aprender sobre ellos de su estética? Aunque la mayoría de la gente prevé que un posible contacto con extraterrestres avanzados traería grandes avances científicos, descubriremos que los mayores beneficios podrían resultar muy diferentes. También es tentador

adoptar una variedad de gerontofilia cósmica que pone grandes esperanzas en el contacto con extraterrestres de larga vida. Dados espacio y tiempo suficientes, se espera que ellos estén cada vez más cerca de descubrir todo lo que hay que conocer acerca del funcionamiento del Universo. Quizá este optimismo sea exagerado. Si queremos entender el Universo, quizá no basten inteligencia y longevidad. Veremos que nuestro propio desarrollo científico depende de varias coincidencias extraordinarias en nuestro entorno y nuestra visión del cielo. En ausencia de dichas circunstancias fortuitas, nuestra comprensión del mundo estaría muy reducida, y nuestras creencias sobre el significado de nuestro lugar en el esquema de las cosas estarían radicalmente alteradas. Además, hay indicios que sugieren que cierto grado de irracionalidad puede ser más que un subproducto embarazoso de la evolución de la inteligencia: quizá sea una característica esencial del progreso en entornos naturales.

En nuestra búsqueda por desentrañar cómo nos influye el Universo tenemos mucho que andar. Empezaremos considerando la cuestión de la perspectiva —nuestra forma de mirar el mundo—. La importancia del punto de vista del espectador fue reconocida en arte antes de que fuese siquiera planteada en ciencia. A los científicos les gustaba verse a sí mismos como observadores de aves cómodamente instalados en un puesto de observación perfecto. Cuando tuvieron que enfrentarse al impacto que tenía su forma de percibir sobre lo que era percibido, la certeza de sus interpretaciones del mundo fue ampliamente cuestionada. Visto en retrospectiva, la base de nuestra confianza en la fiabilidad de nuestra visión de un área importante del mundo quedó establecida por el descubrimiento de que los seres vivos evolucionan y se adaptan a sus ambientes. Estamos acostumbrados a considerar los entornos como locales e inmediatos. En este libro descubriremos cómo nuestra existencia deriva de un entorno cósmico que tiene un tamaño de miles de millones de años-luz. Para que la vida sea posible dentro de un universo, éste debe tener una forma particular. Cuando emerge la vida

consciente, sus experiencias y conceptos están extrañamente influidos por el hecho de que el Universo debe ser grande y viejo, oscuro y frío.

Nuestra siguiente exploración será sobre los tamaños de las cosas. Descubriremos algo de la red de interrelaciones entre seres vivos y las características necesarias de los ambientes que soportan vida. Este camino nos llevará atrás en el tiempo hasta los orígenes de la humanidad; pero al final de esta ruta descubriremos claves inesperadas sobre los orígenes de la estética, el irresistible atractivo de cuadros y paisajes y la importancia de la simetría para los seres vivos. Estas intuiciones arrojarán nueva luz sobre nuestras respuestas al arte moderno generado por ordenador, y nos ayudarán a apreciar lo que exigimos de los paisajes creados por el hombre para que puedan calmamos o estimulamos.

Nuestra tercera excursión nos lleva a las estrellas: a desvelar las formas en las que la mecánica celeste ha influido en la crianza y la naturaleza de la vida en la Tierra. Los seres vivos responden a una sinfonía de ritmos celestes. Durante millones de años han interiorizado muchos de dichos ritmos. Con la llegada de la conciencia y de la cultura, han respondido a su latido de forma diferente pero no menos impresionante. De las cosas que no se ven, pasamos a las cosas que se ven. La apariencia del cielo nocturno es una experiencia universal. Algunas de sus influencias son directas e inadvertidas; otras son generadas por nuestra propia imaginación. Estas imágenes nocturnas dependen, de forma crucial, de dónde y cuándo vivamos. Y cuando la noche pasa, llega el día, con luz resplandeciente —luz coloreada—. Luz y vida se combinan de forma que nos permiten entender nuestras percepciones de color y algunas de sus profundas influencias psicológicas sobre nosotros.

De forma sorprendente, nuestros sistemas de medida del tiempo también esconden antiguas inclinaciones astrológicas, que han resistido todos los esfuerzos de autoridades y poderes para redefinirlos. Los tabloides y las revistas populares aún perpetúan los mitos de la astrología. Irónicamente,

encontraremos que, aunque las constelaciones no pueden decimos nada sobre el futuro, tienen mucho que decimos sobre el pasado.

Desde la vista nos volvemos al sonido para explorar los orígenes de nuestra sensibilidad a la música. ¿Por qué nos gusta? ¿De dónde procede? Llena de sonido y furia, ¿significa algo? Estas son algunas de las preguntas que guían nuestra búsqueda de un entendimiento de lo que es la música, y de qué forma su atractivo universal podría ser un subproducto inevitable de adaptaciones a otros aspectos del ambiente que nos rodea.

Las humanidades no son sólo manifestaciones de la creatividad humana. La estética y el desarrollo cultural pueden encontrarse limitados por un corsé mental impuesto por nuestra naturaleza física y por la universalidad del entorno cósmico en el que vivimos. Las artes y las ciencias manan de una misma fuente, están conformadas por la misma realidad, y sus ideas están relacionadas de forma que poco a poco dejan de verse como actividades alternativas.

Capítulo 2
El impacto de la evolución

La pintura es el arte de proteger superficies planas del clima y exponerlas a los críticos.
AMBROSE BIERCE

Una habitación con vistas. Cuestiones de perspectiva

El titular en el Semanario del Loro decía: Titanic hundido, ningún loro herido.
KATHERINE WHITEHORN

La imaginación —la formación de imágenes— yace en la raíz de toda creatividad humana y dirige nuestra experiencia consciente del mundo. Desde la temprana infancia, estamos formando constantemente imágenes de las cosas, de las personas y de los lugares. A medida que crecemos, aprendemos nuevas maneras de hacerlo. La fotografía, la pintura, la escritura descriptiva, la escultura, la poesía: todos son medios de capturar imágenes en forma permanente, de modo que podamos saborear y reexperimentar los frutos de nuestra imaginación. Pero las artes creativas no son las únicas manifestaciones del impulso imaginativo. La ciencia es otra búsqueda para hacer imágenes del mundo. Tiene objetivos diferentes, y a menudo requiere habilidades diferentes, pero sus comienzos tuvieron mucho en común con los del arte: la observación y representación precisas del mundo. Pese a todo, hay más en el mundo que lo que ve el ojo. La precisión de nuestras percepciones del mundo no es algo que podamos dar por hecho. La ilusión es el lado oscuro de la imaginación, y la ilusión tienta con autoengaño, bajo cuyo dominio no podemos sobrevivir mucho tiempo. El uso

de la imaginación para ampliar nuestra imagen de la realidad sin subvertirla al mismo tiempo es una empresa delicada.

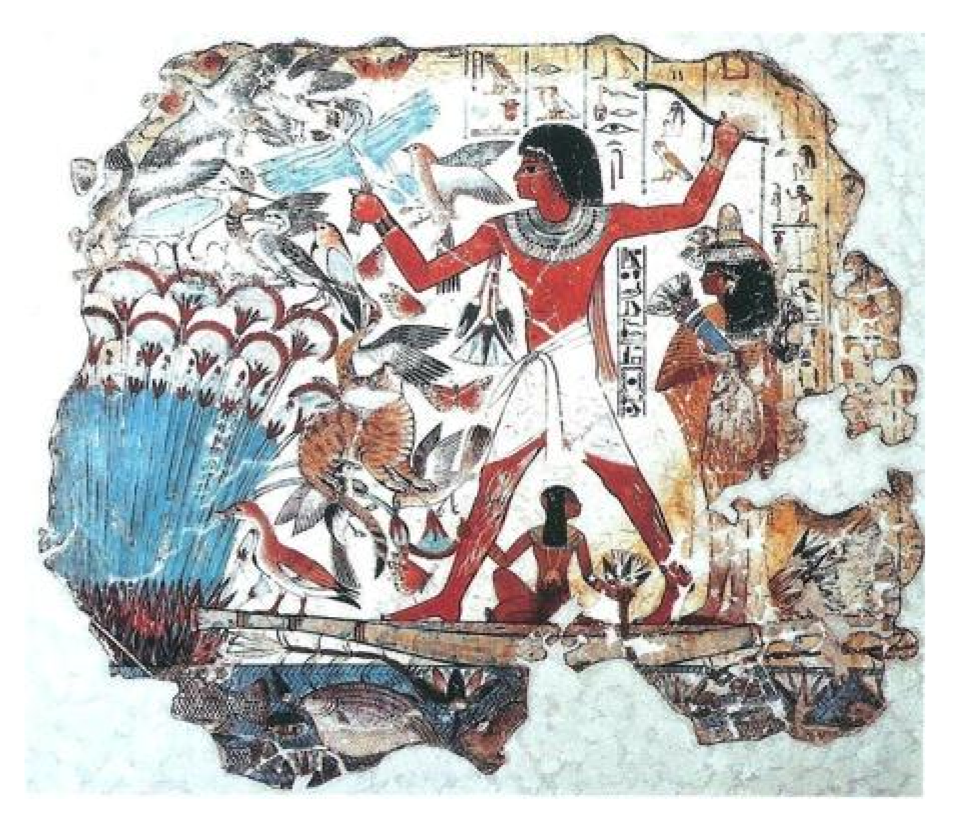


Lámina 1. Caza de aves en los pantanos, de la tumba de Nebamun, c. 1450 a. C.

En cuanto empezamos a cuestionar la fiabilidad de nuestras impresiones del mundo —preguntando si el político o el vendedor de automóviles es realmente todo lo que parece ser o si la carretera en el tórrido desierto está llevando realmente a un vasto oasis— nos convertimos en filósofos. Durante siglos los filósofos han disputado sobre si podemos confiar en nuestras imágenes del mundo. Al hacerlo, no se han preocupado demasiado de por qué tenemos una visión del mundo, y de dónde procede. Nuestras mentes no han caído hechas del cielo. Tienen una historia que las une a la naturaleza del entorno de formas profundas e influyentes. Descubriendo algunos de los propósitos con que evolucionaron nuestras mentes, y la extensión del

entorno al que deben adaptarse, podemos arrojar nueva luz sobre las ideas que las mentes pueden tener. Encontraremos que nuestro «entorno» se extiende mucho más allá de lo que nunca hubiéramos sospechado —imprimiendo su naturaleza sobre la dirección de nuestro pensamiento, conformando nuestras ideas sobre nosotros mismos y el universo en que vivimos.

Apreciar el mundo es una cuestión de perspectiva. Miremos una antigua pintura egipcia (Lámina 1) y parece característicamente singular: complicada y poco realista, como si alguien hubiera aplastado la escena contra la pared. Parte del encanto de las imágenes dibujadas por niños muy pequeños es la *ingenuidad* de esta misma apariencia carente de profundidad (véase la Figura 2.1). Lo que les falta a estos dibujos es una sensación de perspectiva: la presentación de información espacial tridimensional en una superficie plana. Nuestros ojos son inmediatamente sensibles a su ausencia o presencia imperfecta: es la piedra de toque del realismo en el arte figurativo. Tradicionalmente, el uso sistemático de la perspectiva se remonta a su manifestación en una obra de Masaccio, pintada entre 1424 y 1426, denominada *El tributo* (Lámina 2).



Lámina 2. El tributo, de Masaccio, pintado en 1424-1426, en la capilla Brancacci, iglesia de Santa María del Carmine, Florencia.

En esta obra se da una profundidad relativa a tres escenas independientes mediante el artificio de crear un punto lejano (el «punto de fuga») al que parecen converger todas las visuales. El efecto se amplía reduciendo la intensidad de los colores en el fondo.



Figura 2.1. Una ausencia de perspectiva caracteriza los dibujos realizados por niños pequeños. Este dibujo es obra de Danny Palmer, de 9 años.

Aunque Masaccio murió cuando sólo tenía poco más de 20 años, su construcción sistemática de una perspectiva realista retó a otros para crear representaciones aproximadas de objetos en el espacio tridimensional. Piero della Francesca sacó su inspiración de los estudios de Filippo Brunelleschi en perspectiva arquitectónica y de la obra de Masaccio; perfeccionó la organización artística del espacio combinando líneas paralelas a los lados del cuadro con líneas dirigidas hacia el punto de fuga. El espectador siente que está mirando el mundo a través de una ventana abierta (Lámina 3).

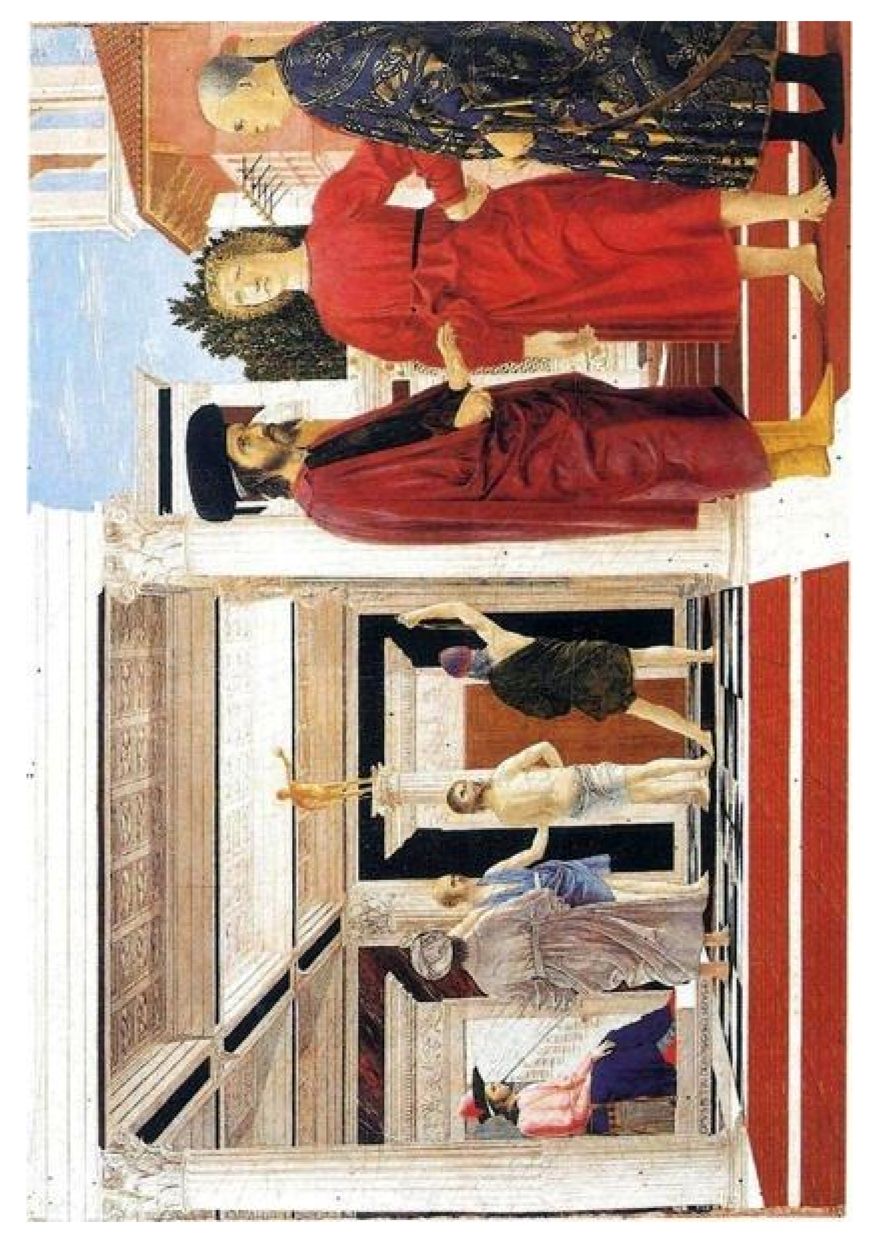


Lámina 3. La flagelación, de Piero della Francesca, pintado en 1455, en el palacio Ducal de Urbino

Los artistas del Renacimiento desarrollaron las intuiciones geométricas que se requieren para crear una perspectiva tridimensional en una superficie bidimensional, y se unieron a los escultores poniendo al observador en una relación más próxima con las cosas representadas. Pero dicha relación era todavía una relación de separación.

La creación de perspectiva elimina al observador de la escena representada dentro del marco, y con ello llega una subjetividad inevitable. Nos quedamos fuera, mirando. Esta separación entre la escena y el observador tiene paralelos en las contemplaciones más abstractas de la relación entre la mente humana y el mundo exterior. Los filósofos europeos, empezando por Descartes, mantenían una división clara entre el observador y lo observado. Nuestra percepción del mundo nos pone en el papel de observadores perfectamente ocultos. Ninguna observación del mundo podía alterar su carácter: el mundo exterior estaba realmente fuera. Pero no todas las culturas reflejaron esta separación entre el perceptor y lo percibido. La pintura paisajística china manifiesta una aproximación comprometida a la relación entre el espacio tridimensional y su representación en dos dimensiones. No introducía perspectiva lineal de la forma que encontramos en Occidente, en la que el punto de vista del observador está situado fuera del cuadro, delante del lienzo. En lugar de ello, en la pintura china el punto de vista se localiza de manera ambigua dentro del paisaje. Uno no puede decir dónde está situado el observador con relación a las montañas y las corrientes representadas.

Así, uno se convierte en parte de la escena, igual que el propio artista se siente uno con lo que está representando. Los paisajes chinos dejan deliberadamente al observador privado de claves respecto a su localización en la imagen. Debemos estudiar todo el cuadro si la mente quiere encontrar su punto de vista. La búsqueda de la perspectiva escurridiza anima a muchas lecturas diferentes del cuadro y desafía los intentos de dotarle de un único mensaje (Figura 2.2).

Otra forma de sutileza visual en estos paisajes orientales es la ausencia de sombra. La sombra amplía la ilusión de perspectiva al dotar al observador de una posición privilegiada en el espacio o el tiempo, determinada por la longitud y dirección de las sombras arrojadas por los rayos del Sol. El

contraste entre la obra oriental sin sombras y un maestro occidental del uso de la sombra, como Rembrandt o Wermeer, no podría ser mayor.

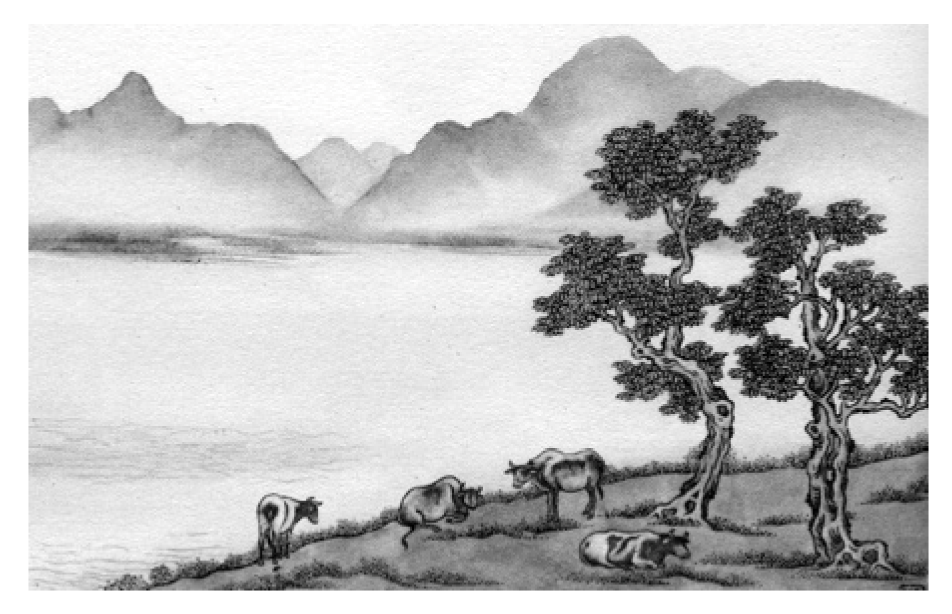


Figura 2.2. Vacas en Derwentwater de Chiang Yee, perteneciente a El Viajero silencioso, un artista chino en el país de los lagos, publicado originalmente en Londres en 1937.

El dibujo del observador y lo observado en un nexo contemplativo, mediado por una ambigüedad de perspectiva, refleja el tono de mucho del arte oriental. Lo que busca es ampliar nuestra mediación de la belleza natural, antes que celebrar meramente nuestro poder de replicarla en otro medio estático. Este énfasis en el acto de observación es sorprendente. Mientras que una obra del arte occidental sería exhibida continuamente, una delicada seda oriental podría desenrollarse sólo para períodos ocasionales de silenciosa meditación en solitario.

La violación más extrema de la separación occidental entre el medio y el mensaje se encuentra en una forma de arte como el origami (papiroflexia) japonés. Mientras que el arte occidental se centra en la libertad de mover imágenes en un papel o en un lienzo para crear pautas fijas, el origami ignora esa separación entre la imagen y el papel. El papel se convierte en

parte de la imagen, y se retuerce y se pliega hasta que él mismo *es* el cuadro, y no simplemente la superficie que lo contiene.

Otra diferencia profunda entre las actitudes oriental y occidental hacia el observador y lo observado puede verse en la espontaneidad que se requiere al artista. En Occidente, el desarrollo de la pintura al óleo permitía al artista evolucionar y revisar su obra durante un largo período de tiempo. Ya no estaba cautivo de la naturaleza irrevocable del medio como lo estaban el pintor al fresco o el acuarelista. Pero este revisionismo incesante no era una respuesta aceptable para el artista oriental. El exquisito trabajo a tinta sumi-e japonés se ejecutaba con un solo trazo ininterrumpido del pincel sobre el papel, capturando la idea del momento en un gesto irrevocable. La sensación de tiempo y evolución debe encontrarse no en las revisiones del artista, refinando continuamente su imagen del mundo, sino en las representaciones del cambio natural.

El arte del bonsái representa este aspecto temporal al sugerir el crecimiento natural de las cosas mediante una hábil intervención hortícola. En miniatura, simboliza la naturaleza viva y creciente —pero inacabada— del mundo. Está en abierto contraste con el énfasis de muchas formas primitivas del arte occidental. Allí, el ojo era invitado a contemplar la compleción y perfección en la disposición de las cosas, ya fuera un paisaje idílico o una matriz de símbolos religiosos.

Otro contraste entre las primitivas representaciones occidental y oriental del mundo queda subrayado por una tendencia que se desarrolló en Europa durante los siglos siguientes al Renacimiento. Mientras que el arte medieval había sido fuertemente simbólico en sus mensajes religiosos, y el arte oriental subrayaba el uso de una delicada armonía compositiva como ayuda a la meditación, en el arte occidental posterior empezó una búsqueda de realismo. En lugar de organizar símbolos en un lienzo para impartir un mensaje que sólo los versados en el simbolismo podían descifrar, los artistas occidentales ponían su mira en la perfección de la representación de la

imagen que había registrado el ojo. Esto supone dos habilidades vitales, que son todavía más difíciles de adquirir porque son diametralmente opuestas. Por una parte, el realismo requiere un conocimiento avanzado de la geometría, la perspectiva y el comportamiento de la luz. Pero, por otra, nos exige que nos vaciemos de nuestro entendimiento de *lo que* se está representando. Si creemos que el niño que estamos dibujando es divino, esto tendrá una influencia en nuestras representaciones que oscurecerá de alguna manera los objetivos del realismo literal. Desde el siglo XVI hasta mediados del siglo XIX, los artistas occidentales desarrollaron métodos que producían obras cada vez más realistas gracias al refinamiento de técnicas sutiles de sombreado y perspectiva. Tan influyente llegó a ser este trabajo que fijó los cánones para el realismo por los que se han juzgado todas las obras posteriores, y nos llevó a considerar el realismo como el pináculo hacia el que todas las técnicas anteriores estaban ascendiendo. Pero, a pesar de su familiaridad, el realismo tiene algo de novedad sofisticada que no se desarrolló en culturas que carecían de un elaborado conocimiento geométrico y óptico. Esto resalta la laguna que hay entre el proceso de ver el mundo de forma clara y precisa (lo que la mayoría de nosotros creemos hacer), y producir un dibujo preciso de lo que percibimos. Perdemos de vista la imagen real y añadimos todo tipo de cambios y correcciones al mensaje que nuestros ojos tratan de damos. Si miramos algunas formas artísticas muy primitivas, sacamos la impresión de que la idea de ajustar la imagen a la realidad nunca entraba en juego, y su interpretación final de las cosas vistas se reducía a las primera imágenes espontáneas. Una influencia interesante sobre algunas culturas, como el Islam y el judaísmo, era el tabú religioso de la representación artística de seres vivos. Esto sofocó el nacimiento de cualquier tradición de representación realista de la realidad. En el arte islámico encontramos una tradición completamente diferente de diseño

geométrico y teselación, que explora la forma en que puede ordenarse y dividirse el espacio antes que representarse de forma precisa[1].

La lección interesante que aprendemos de estas visiones artísticas es que hasta hace sólo unos pocos cientos de años el realismo era bastante menos obvio de lo que parece hoy a muchos. El fuerte énfasis medieval en el símbolo y la representación esquemática levanta una cuña entre la realidad en bruto y la realidad aprendida[2].

El paso del simbolismo al realismo trajo consigo una nueva actitud hacia el color en el mundo posrenacentista. El color desempeña un papel central en la aproximación simbólica a la representación porque los colores llevan significados. De hecho, aún lo hacen; sólo tenemos que considerar la importancia de los colores en los asuntos públicos —en uniformes, vestimentas religiosas y banderas nacionales—. Los más fuertemente simbólicos siguen siendo el dorado, el negro, el blanco y el rojo. Aunque para los realistas el color se hizo menos importante que la línea, la composición y la perspectiva, ofrecía el máximo ámbito para la novedad. Algunos, como Georges Seurat, invirtieron un gran esfuerzo en la comprensión de la visión del color y la mezcla de colores.

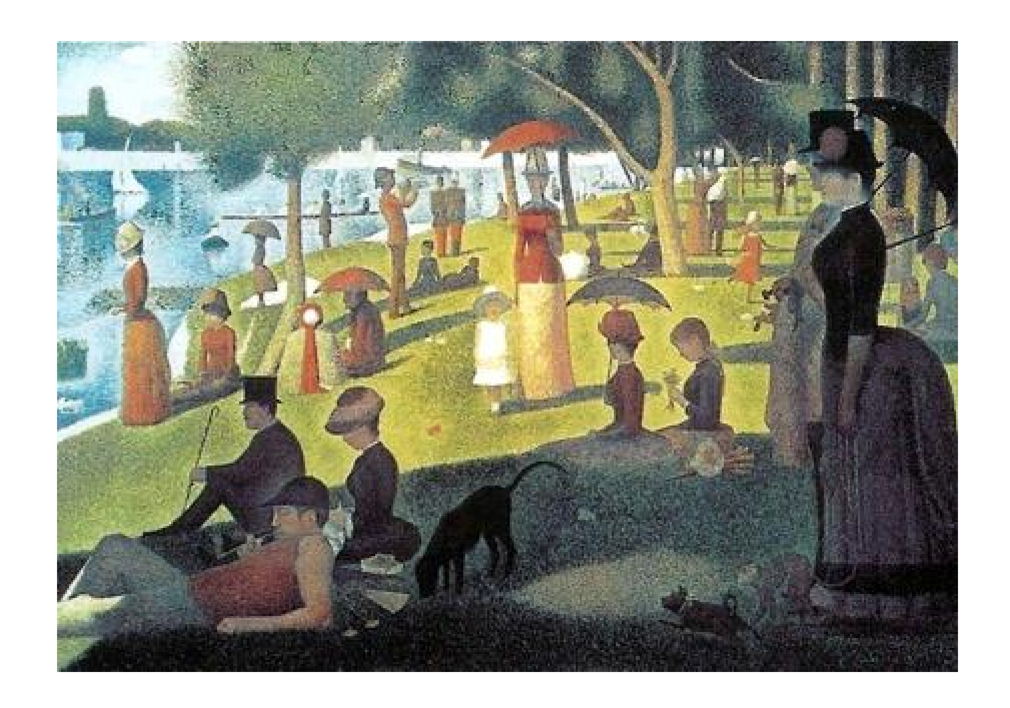
La técnica de Seurat de cubrir un lienzo con una multitud de puntos minúsculos de diferentes colores pero tamaño similar ilustra el principio de mezcla de color que utilizan nuestras pantallas de televisión. Una pantalla de televisor muestra los colores de tres tipos de material fosforescente que

[1] Del mismo modo, el carácter particular de la tradición histórica cristiana, con su foco en la crucifixión de Cristo, orientó a los artistas occidentales a perfeccionar las representaciones estáticas del desnudo humano. El simbolismo religioso y el deseo de representar un suceso histórico venció el pudor natural por la representación del desnudo humano. Si, como afirmaba Enoch Powell, Cristo hubiera sido apedreado, entonces la representación artística de la movilidad y del movimiento humano se hubiera desarrollado de una forma más significativa que como lo hizo la representación del cuerpo humano estático.

[2] Por supuesto, con el tiempo se produjo una reacción por parte de los cubistas y expresionistas contra la tendencia convergente hacia un realismo cada vez mayor, y por parte de los fovistas y los impresionistas contra el dominio del color por el simbolismo. Se han propuesto muchas razones para estas reacciones. Están quienes las ven como nada más que la ubicua «oscilación del péndulo» que se encuentra en tantos asuntos humanos: conforme se hace más difícil crear obras nuevas e interesantes siguiendo el desarrollo en una dirección, crecen las probabilidades de un giro iconoclasta de 180°. Alternativamente, están quienes buscan paralelismos con desarrollos en otras esferas de actividad humana —musical, científica, social— que estimulan las desviaciones artísticas del status quo. Tal aproximación paralelista sigue dejando sin responder la pregunta de por qué se da un cambio en cualquiera de estas actividades. Además, las influencias de otras esferas suelen ser vehementemente negadas por quienes practican cualquier forma de arte.

brilla cuando sobre él incide el haz de electrones disparado desde el cañón del tubo.

Cada uno de estos materiales brilla con un color diferente cuando es excitado, y el ojo percibe la muestra total de puntos coloreados como una imagen en color integrada. Puesto que las intensidades de los colores primarios, como el rojo y azul, son muy bajas para dichos materiales, se hace un compromiso y se utilizan el naranja, el azul claro y el verde amarillento como colores básicos.



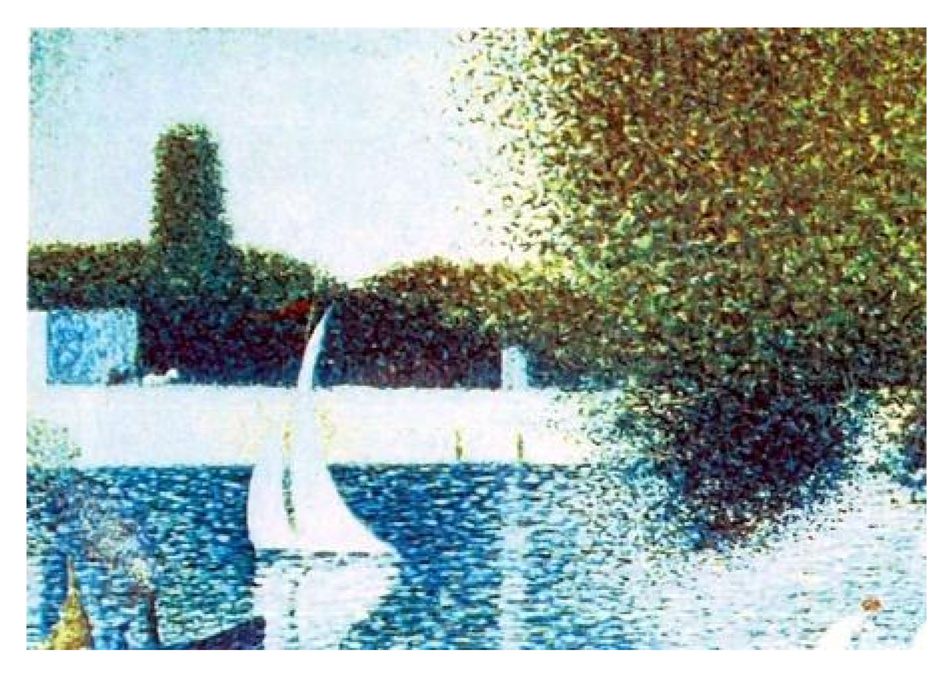


Lámina 4. Los lienzos de Georges Seurat están cubiertos de miles de puntos del mismo tamaño. El ojo los ve como una variación de color uniforme. Este «puntillismo» se ilustra en su famoso cuadro Tarde de domingo en la isla de La Grande Jatte, de 1884-1886, en el Art Institute de Chicago. Abajo se presenta un fragmento ampliado que muestra la construcción multipunto de la imagen.

Los artistas pueden adoptar el mismo enfoque pintando muchos pequeños puntos de color, que, cuando se ven a una distancia de algunos decímetros, son mezclados por el ojo para producir un campo de color de variación suave (Lámina 4). Cuando se ven de cerca la granulación es evidente.

Seurat explotaba este proceso de manera muy literal, pero fue utilizado con sutileza aún mayor por Monet y muchos otros impresionistas. Al generar un campo de color aditivamente, se crea un contraste con la tradicional creación «substractiva» del color que mezcla pigmentos de diferentes colores primarios. Este se denomina método «substractivo» porque el pigmento no produce luz del color requerido. Un pigmento azul se denomina así porque absorbe todos los colores del espectro de la luz blanca distintos del azul. Esto significa que las leyes para la adición de luces coloreadas son completamente

diferentes de las de la adición de pinturas coloreadas. La pintura roja absorberá todos los colores de la luz blanca excepto el rojo; la pintura verde todos salvo el verde. Así pues, si se mezclan pinturas roja y verde, todo es absorbido y resulta una inútil mezcla negra. Por el contrario, la proporción de luz reflejada por los diferentes colores es bastante similar y por ello es muy difícil producir una mezcla brillante con una gama de colores estrecha; la mayoría de las mezclas sólo producen un marrón oscuro.

Lavadores de cerebros. Distorsiones de pensamiento y espacio

La literatura se expresa por abstracción, mientras que la pintura, por medio de dibujos y color, da forma concreta a sensaciones y percepciones.

PAUL CÉZANNE

La imagen occidental de la mente, separada del cuerpo, percibiendo el mundo exterior solo e imperturbado, sufrió su más profundo examen a manos del filósofo alemán del siglo XVIII Immanuel Kant. En su juventud, Kant fue un entusiasta de una descripción científica del mundo basada en las leyes de Newton del movimiento y la gravitación. Hizo contribuciones importantes a la astronomía —propuso una teoría para el origen del sistema solar— y estaba satisfecho con la visión común según la cual había un mundo real «ahí fuera» que podía ser descrito por nuestras mentes. Pero, pese a su primer éxito, Kant desarrolló una actitud cada vez más crítica hacia la naturaleza del conocimiento humano y cómo se adquiere. Reconoció que la mente humana hace algo cuando procesa percepciones sensoriales del mundo exterior.

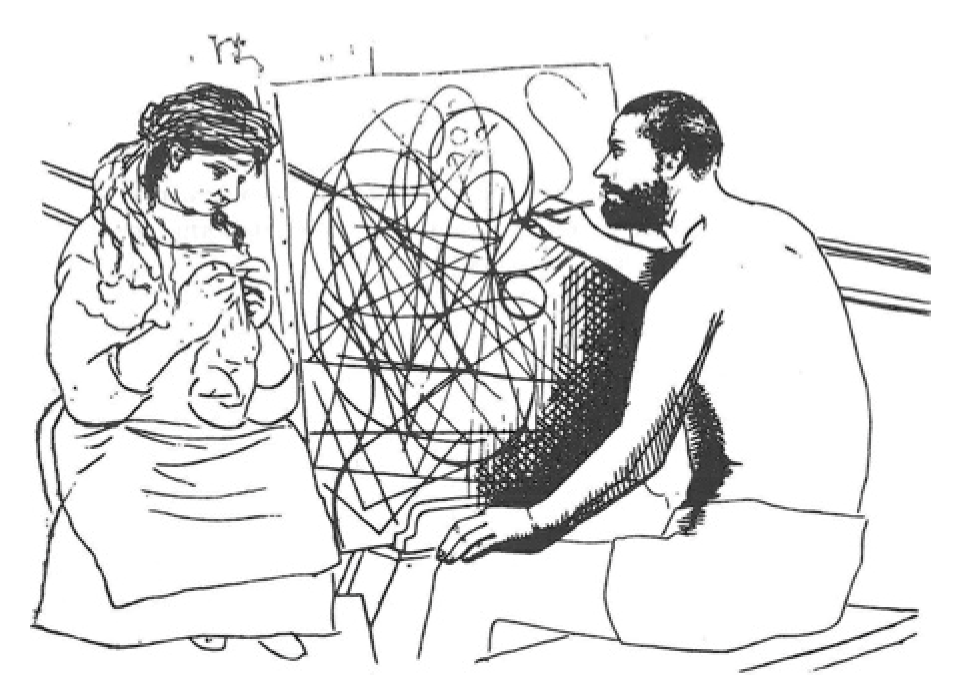


Figura 2.3. Artista y modelo, de Pablo Picasso, c. 1932. Cahier d'Arts.

Organiza la información. Podría decirse que nuestras mentes tienen casilleros, o categorías, en donde deben encajarse nuestras percepciones del mundo. Y por ello debe existir un hueco irreducible entre el mundo real y nuestra aprehensión de él. Nunca podemos conocer las «cosas en sí» inexpurgadas y no traducidas, sino sólo una versión corregida —y posiblemente distorsionada— que ha sido filtrada por nuestro aparato conceptual. Nuestra concepción de su naturaleza estará sesgada por la gama de imágenes mentales que podemos acomodar, como parodia la Figura 2.3.

Kant se valió de esta idea para socavar todo tipo de afirmaciones vagas que habían estado haciendo confiadamente sus contemporáneos sobre la naturaleza de la realidad, y luego la utilizó como punto de partida para su propia y compleja teoría del conocimiento. Kant nos ve como observadores del mundo a los que les está negado el acceso a la verdadera realidad independiente del observador —un hecho que nos coloca a cada uno de nosotros en el centro de nuestro propio «pequeño» universo.

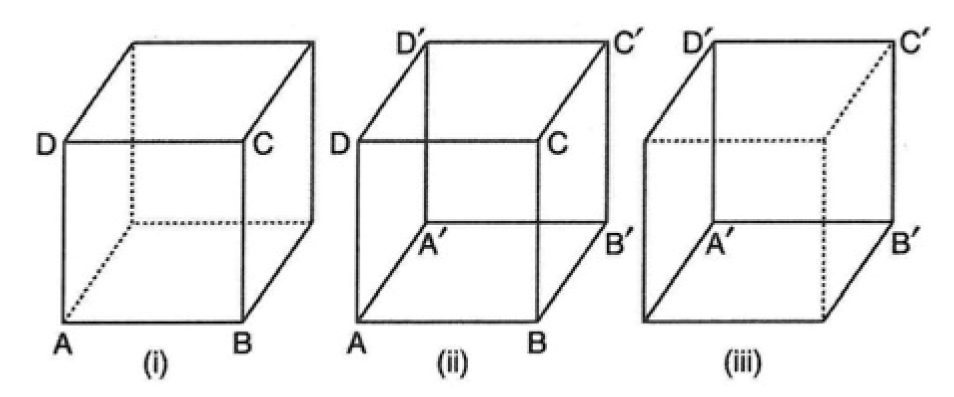


Figura 2.4. El Cubo de Necker, con todas las líneas continuas, se muestra en el centro como (ii). A ambos lados, (i) y (iii) ofrecen interpretaciones visuales alternativas del mismo. Al mirar el cubo de Necker podemos ver la interpretación (iii), seguida inmediatamente después por la interpretación (i), seguida por rápidos cambios de una a otra cuando tratamos de decidir si es A o A' la que está más próxima a nosotros. Como Necker resaltó por primera vez, la diferencia más notable entre (i) y (iii) parece ser la orientación del cubo.

Consideremos un ejemplo en el que nuestra mente se desgarra entre dos posibilidades ante el problema de la perspectiva. Fue descubierto por un cristalógrafo suizo, Louis Albert Necker, en 1832. Si miramos fijamente los cubos de la Figura 2.4, el sentido de perspectiva en el que nos basamos para crear una buena interpretación tridimensional de una imagen puramente bidimensional, formada en el fondo de la retina, se confunde: no hay una única imagen tridimensional que produzca esta proyección bidimensional[3]. El cerebro ha construido dos modelos de un cubo sólido, cada uno de ellos con una orientación diferente en el espacio, y salta continuamente de uno a otro, ofreciéndonos ambas perspectivas posibles. Es como si hubiera una ventaja en cambiar de vez en cuando a otra visión de las cosas, por si la que uno ya ha escogido es errónea. Movimientos artísticos enteros han crecido

[3] Una forma acústica de esta ambigüedad perceptual se da con la secuencia de acordes que muestra el fenómeno *diabolus in music.*

explotando esta ambigüedad en el procesamiento de imágenes. Victor Vasarely y otros representantes del movimiento op-art han creado imágenes complicadas que explotan las incertidumbres en la identificación de líneas por el cerebro, y sus asociaciones entre formas y puntos, de modo que hay una perspectiva continuamente cambiante. La imagen nunca parece estática. Un ejemplo de esta forma de arte dinámica se muestra en la Figura 2.5. Ilustra el impacto de nuestras categorías mentales sobre la percepción: las líneas de la página *no* se mueven por mucho que se lo digan sus ojos.

Pese a la fuerte actitud escéptica de Kant hacia la posibilidad de un conocimiento del mundo independiente de la mente, hay interrogantes. ¿Por qué hay tantas personas de acuerdo en tantas de las cosas que ven? Parece que los seres humanos comparten muchas categorías de pensamiento idénticas. ¿Por qué nuestra imagen mental del mundo permanece relativamente constante de un instante al siguiente? ¿Hay alguna razón por la que nuestras categorías mentales no pudieran cambiar de la noche a la mañana?

Hay dos polos extremos de opinión respecto a la relación entre la realidad verdadera y la realidad percibida. En un extremo encontramos a los «realistas», para quienes el filtrado de la información sobre el mundo que hacen las categorías mentales es una complicación inocua que no tiene ningún efecto importante sobre el carácter de la realidad verdadera «ahí fuera». Incluso cuando supone una gran diferencia, a menudo podemos entender lo suficiente de los procesos cognitivos implicados para reconocer cuándo están siendo sesgados y hacer una corrección adecuada. En el otro extremo encontramos a los «antirrealistas», que nos negarían cualquier conocimiento de esa escurridiza realidad verdadera. Entre estos dos extremos encontraremos un espectro de posiciones de compromiso lo bastante numerosas para llenar la biblioteca de cualquier filósofo: cada una asigna un peso diferente a la distorsión que hacen nuestros sentidos de la realidad verdadera.

Podemos ver que la perspectiva de Kant es preocupante para la visión científica del mundo. A finales del siglo XVIII había una gran confianza en los éxitos de la ciencia en desvelar los secretos de la Naturaleza. El triunfo de las «leyes» de la Naturaleza de Newton llevó a afirmaciones cada vez más confiadas en que la perfecta armonía de las leyes de la Naturaleza, y su acuerdo con el bienestar humano, apuntaban a la existencia de una deidad legisladora benigna. Pero los argumentos de Kant socavaron la fuerza de cualquier argumento a favor de la existencia de Dios que apelara a las leyes observadas como prueba de un diseño antropocéntrico de la Naturaleza. Dichas leyes podrían estar impuestas al mundo por nuestras categorías mentales: no reflejaban necesariamente la verdadera naturaleza de las cosas. Éste no es un argumento contra la existencia de Dios, ni siquiera contra el diseño antropocéntrico de la Naturaleza. No era ése el blanco de Kant; de hecho, él era bastante comprensivo con los propósitos de esas teorías del diseño. Lo que él pretendía era convencer a sus lectores de que no podemos utilizar la evidencia de nuestros sentidos, o nuestros pensamientos, para extraer conclusiones absolutamente fiables acerca de la naturaleza y propósito últimos de cualquier «realidad verdadera».

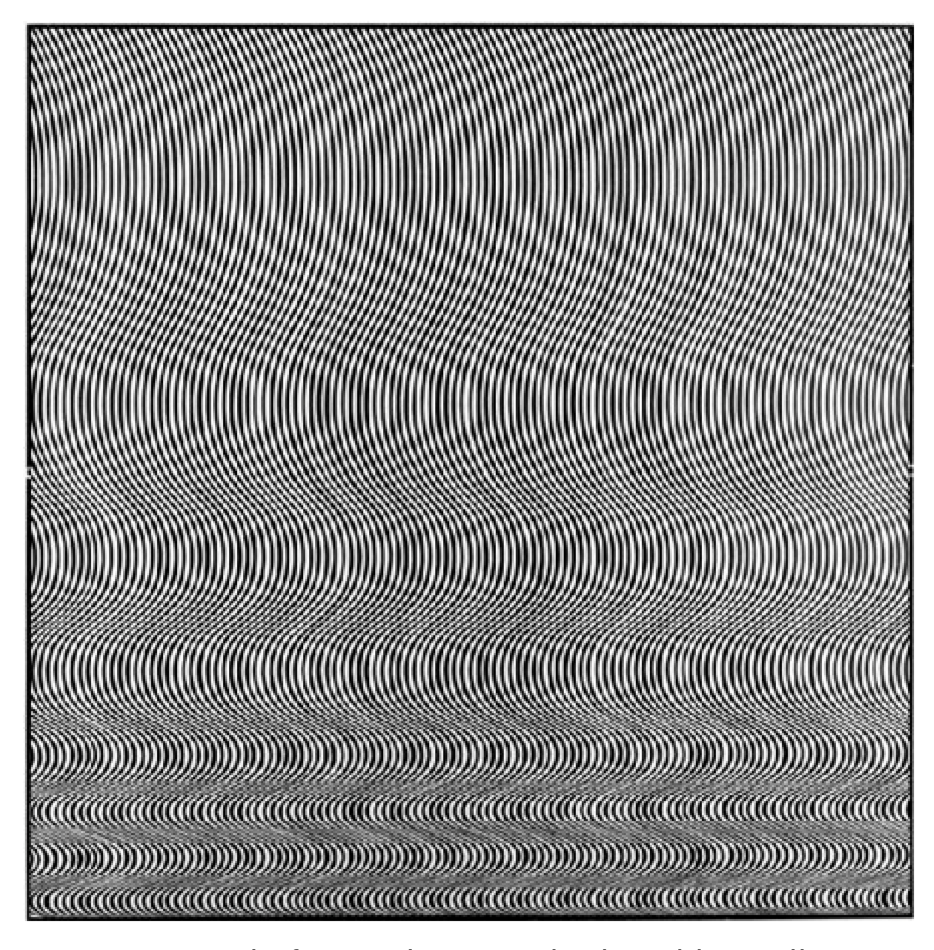


Figura 2.5. Op Art en la forma de Cascada de Bridget Riley, 1963. Tate Gallery, Londres.

Si Kant hubiera vivido en la era del ordenador, habría dicho que las categorías mentales que ordenan aspectos básicos de nuestra experiencia del mundo, como nuestras intuiciones del espacio y el tiempo, están «cableadas» en nuestros cerebros. Distinguir estos rasgos cableados en el cerebro no es fácil. Para Kant nuestra concepción del espacio era una de estas categorías mentales innatas e inalterables. No era algo que aprendiéramos por experiencia; era una base para nuestra experiencia. Al considerar así nuestra percepción del espacio, Kant estaba influido por la asentada creencia en el carácter absoluto del espacio euclídeo. Ésta es la geometría de las líneas sobre superficies planas que aprendemos en la escuela. Se caracteriza por el hecho de que si formamos un triángulo

uniendo tres puntos por líneas de mínima longitud, entonces la suma de los tres ángulos interiores del triángulo es siempre igual a 180 grados (Figura 2.6).

El descubrimiento de tales verdades y otras (como el teorema de Pitágoras para triángulos rectángulos) llevó a filósofos y teólogos a creer en la existencia de una verdad absoluta y en nuestra capacidad para discernir (al menos) parte de ella. La formulación y la presentación de la teología medieval no es distinta del estilo de los clásicos *Elementos* de geometría de Euclides. Esto no es casual. Testimonia un deseo de dotar a las deducciones teológicas de un estatus similar al de los teoremas de las matemáticas. La geometría euclídea era considerada como un fragmento de verdad absoluta sobre la naturaleza del mundo. No era simplemente un razonamiento matemático sobre un mundo posible, sino que mostraba cómo era realmente la realidad. Sustentaba la creencia de teólogos y filósofos en que había razón para creer en la existencia de la verdad absoluta. Más aún, que la habíamos descubierto y entendido. Así pues, podíamos tener confianza en nuestra capacidad para apreciar, al menos parcialmente, verdades absolutas sobre el Universo. En este contexto es como debe verse la elección de Kant de la geometría euclídea como una verdad necesaria sobre la realidad. Por desgracia, resultó ser una mala elección. No mucho tiempo después, a mediados del siglo XIX, Karl Friedrich Gauss, Johann Bolyai y Nikolai Lobachevski descubrieron que pueden existir otras geometrías lógicamente consistentes que difieren de la concepción de Euclides. Estas geometrías «no euclídeas» describen las propiedades de líneas y curvas en una superficie que no es plana, y donde los triángulos construidos a partir de las líneas más cortas entre tres puntos no tienen ángulos interiores que suman 180 grados (véase la Figura 2.6).

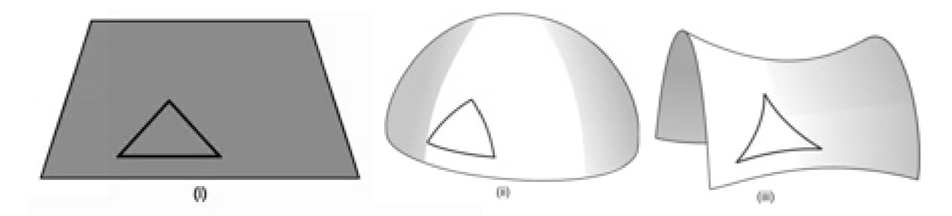


Figura 2.6. (i) Un triángulo euclídeo en una superficie plana y dos triángulos no euclídeos en superficies curvas cerrada (ii) y abierta (iii). En la superficie plana los ángulos interiores del triángulo suman 180 grados. En la superficie cerrada suman más de 180 grados; en la superficie abierta suman menos de 180 grados. En cada superficie se define una «línea recta» entre dos puntos como la distancia más corta entre ellos que yace en la superficie.

Kant creía que nuestra aprehensión de la geometría euclídea era inevitable porque estaba preprogramada en el cerebro. Sabemos que esto no es cierto.

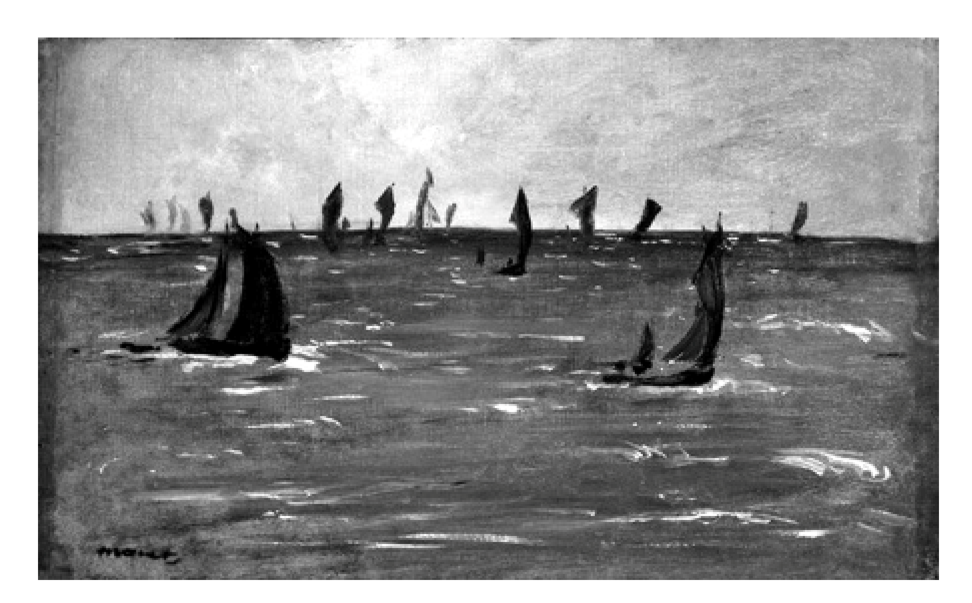


Figura 2.7. Barcas en Berck-sur-Mer, de Édouard Manet, de 1873. Museo de Arte de Cleveland.

No sólo podemos concebir fácilmente geometrías no euclídeas, sino que, como Einstein propuso primero y las observaciones han confirmado desde entonces, la geometría subyacente del Universo es no euclídea. Pero esta

desviación de la regla de Euclides sólo se manifiesta a distancias astronómicas. Una propiedad de todas las superficies curvas es que parecen planas cuando se ven localmente en regiones suficientemente pequeñas. La superficie de la Tierra es curva, pero parece plana cuando recorremos distancias cortas. Sólo cuando observamos de forma precisa sobre grandes distancias se hace evidente la curvatura del horizonte, como en la famosa marina de Manet *Barcos* que fue pintada en 1873 (véase la Figura 2.7).

Este descubrimiento geométrico supuso un fuerte golpe para la confianza de teólogos y filósofos en el concepto de verdad absoluta. Dio crédito a muchas formas de relativismo que ahora nos son familiares. Aparecieron libros y artículos que exploraban las consecuencias del carácter no absoluto de cualquier sistema concreto de hipótesis para códigos de ética, sistemas económicos y actitudes hacia las culturas no occidentales. Mientras que hasta entonces había razones para creer, por analogía con la naturaleza incontrovertible de la geometría de Euclides, que había un sistema «mejor» de valores, o mejor para dirigir una economía, y todos los demás eran inferiores, ahora había razones para repensarlo. Más tarde, los matemáticos socavarían aún más los cimientos de la verdad absoluta al demostrar que ni siquiera son absolutas las reglas del razonamiento lógico que Aristóteles nos había legado. Con la lógica sucede lo mismo que con las geometrías: puede construirse un número infinito de esquemas consistentes de razonamiento lógico. No hay nada como una verdad absoluta en lógica y en matemáticas. Lo más que podemos hacer es hablar de la verdad de enunciados dado un conjunto de reglas de razonamiento. Es totalmente posible tener enunciados que son verdaderos en un sistema lógico, pero falsos en otro.

Mucho se ha escrito sobre el impacto del desarrollo de la geometría no euclídea sobre las imágenes artísticas del mundo a comienzos del siglo XX. Algunos han argumentado que la introducción de nuevas geometrías, y las concepciones revisadas del espacio y el tiempo que surgieron gracias a las teorías de la relatividad de Einstein, inspiraron el desarrollo de nuevas

formas de arte geométricas como el cubismo —aunque Picasso afirmaba que él no sacó ninguna inspiración artística directa de la teoría de la relatividad, pues, decía él,

> *Matemáticas, trigonometría, química, psicoanálisis, música y lo que sea han sido relacionados con el cubismo para darle una interpretación más fácil. Todo esto ha sido pura literatura, por no decir puro absurdo, que dio malos resultados al cegar a la gente con teorías. El cubismo se ha mantenido dentro de los límites y limitaciones de la pintura, sin pretender nunca ir más allá.*

Quienes buscaban tales motivaciones para las nuevas y poco convencionales formas de arte abstracto quizá estaban mirando en el lugar equivocado. No pueden ser las líneas curvas y los triángulos de la geometría no euclídea, que son manifestaciones de dicha novedad, las que inspiran a Manet a pintar un horizonte curvo realista en una marina, o a Cézanne o Picasso a distorsionar o a apartarse de los estilos de representación tradicionales.

Las geometrías no euclídeas han estado siempre con nosotros y fueron bien apreciadas por los artistas mucho antes de que fueran reconocidas por los matemáticos[4]. Para verlo basta con mirar una obra del siglo XV como el retrato del *Matrimonio Arnolfini* (Lámina 5) de Jan van Eyck. En ella se muestra al mercader toscano Giovanni Arnolfini y su mujer, junto con su fiel perro, en su hogar; toda la escena está perfectamente reflejada en un espejo convexo que cuelga en la pared que tienen detrás (mostrado dentro del cuadro) y la perspectiva se complica por el uso de más de un punto de fuga. El hecho de que el sistema lógicamente impecable de la geometría euclídea

[4] Los ejemplos más impresionantes son las construcciones geométricas no euclídeas en algunos *Sriyantra,* diseños utilizados como ayuda a la meditación en varios lugares de la tradición tántrica en la India. Aunque la mayoría de los sellos *Sriyantra* son planos y euclídeos, existen algunos ejemplos en los que el intrincado diseño yace en una superficie curva regular. Para más detalles véase mi libro *La trama oculta del Universo.*

diera formas planas que podían verse en un espejo distorsionante debería haber sugerido que la visión distorsionada era igualmente consistente como una geometría axiomáticamente definida, que podía haber sido unívocamente creada en una superficie plana aplicando un conjunto diferente de reglas «distorsionadas».



Lámina 5. El matrimonio Arnolfini, de Jan van Eyck, pintado en 1434. Toda la escena se refleja en el pequeño espejo circular convexo que cuelga en la pared del fondo, mostrado abajo en detalle.



Resulta intrigante que la técnica de la anamorfosis utilizada por artistas desde el siglo XVI en adelante (véase el ejemplo en la Figura 2.8) estaba también basada en tales distorsiones, pero el énfasis se ponía enteramente en el hecho de que la imagen «euclídea» plana puede restaurarse mirando desde un ángulo o en un espejo adecuadamente curvo, y no en la consistencia lógica de la imagen «no euclídea».

Un cambio revolucionario en la perspectiva del mundo, y su representación, puede haber sido promovido por el ambiente general de relativismo que fue estimulado por el descubrimiento de que ni siquiera la verdad geométrica era absoluta. Si no había razón para creer en verdades matemáticas absolutas acerca del mundo, ¿por qué debería haber sólo una manera de pintarlo o sólo una lógica para regir nuestros pensamientos sobre el mismo? Es probable que este clima general de exploración de nuevas posibilidades,

donde en un tiempo hubo certeza, haya sido más influyente que cualquier formalización de una geometría que ya era, aunque fuera de forma inconsciente, apreciada por los artistas.



Figura 2.8. Un retrato anamórfico de Eduardo VI, realizado por William Scott en el siglo XVI, visto (arriba) de frente y (abajo) oblicuamente, con lo que se recupera la imagen no distorsionada.

Los herederos. Adaptación y evolución

Ícaro ascendió hacia el Sol hasta que la cera que unía sus alas se fundió y su vuelo terminó en un fracaso... Las autoridades clásicas nos dicen, por supuesto, que sólo estaba «haciendo una temeridad», pero yo prefiero considerarle como el hombre que sacó a la luz un serio defecto de construcción en las máquinas voladoras de su tiempo.

ARTHUR S. EDDINGTON

En el siglo XVIII empezaba a sospecharse de que el espectro de los seres vivos no era fijo. Resultaba evidente que era posible una transformación de sus características corporales y hábitos de una generación a otra. Esto podía verse si se examinaban los resultados de la cría selectiva. También se estaba evidenciando que muchas especies vivientes se habían extinguido. Bestias exóticas —mamuts y tigres de grandes dientes— habían dejado espectaculares restos fosilizados; a comienzos del siglo XIX su estudio se convertiría en una ciencia bien establecida. Estos hechos apuntaban a que la creencia en que los seres vivos eran creados en perfecta armonía con su entorno y con sus congéneres dejaba mucho que desear. De todas formas, quedaba el hecho admirable de que los seres vivos parecían estar hechos a medida de su ambiente. Esto convenció a los teólogos naturales de que una guía divina estaba actuando en el mundo viviente, diseñando criaturas que se ajustaban a su hábitat de forma óptima. Recíprocamente, otros argumentaban que la existencia de un encaje tan perfecto entre los requisitos ambientales de los seres vivos y el statu quo mostraba que existía un gran diseño —y con ello que debía haber un Gran Diseñador—. Existían otras formas de la teoría del diseño, pero eran bastante diferentes. Éstas no

apelaban a las notables interrelaciones entre las características del entorno y el funcionamiento de los organismos vivos, sino a la maravillosa simplicidad y universalidad de las leyes de la Naturaleza que gobernaban los movimientos de la Tierra y los cuerpos planetarios. Dichos argumentos tendían a atraer a los físicos y astrónomos de tendencia religiosa antes que a los biólogos.

El primer intento por desarrollar una teoría que explicara la sorprendente compatibilidad entre los organismos y su entorno apelando a cambios que hacían que los dos convergieran en el tiempo fue obra del zoólogo francés Jean Baptiste de Lamarck (1744-1829). Como los teólogos naturales, Lamarck partía de la hipótesis de que los organismos están siempre bien adaptados a su hábitat. Pero a diferencia de ellos, reconocía que, puesto que el entorno cambia, así deben hacerlo los organismos si van a permanecer en un estado de adaptación. Lamarck creía que los cambios ambientales llevarían a los organismos a aprender nuevos comportamientos o a desarrollar cambios anatómicos que se reforzarían mediante el ejercicio repetido. Por el contrario, los que cayeran en desuso desaparecerían poco a poco. Cualquier cambio estructural o conductual inducido por las nuevas condiciones ambientales sostendría un estado de adaptación que podría transmitirse por herencia. Subyacente a todo el proceso había una creencia en que los seres vivos tienden a evolucionar hacia las formas estructurales más perfectas y armoniosas.

En el escenario de Lamarck, cualquier cambio en el ambiente determina directamente la evolución de los seres vivos. A medida que los árboles se hicieran más altos, también las jirafas tendrían que desarrollar patas o cuellos más largos para seguir alimentándose de sus hojas. Si un minero desarrollara músculos más grandes por elevar cargas pesadas, entonces su estructura muscular sería heredada por sus hijos. Éste, por supuesto, es el tipo de hipótesis razonable que encuentra su lugar en el folclore; era ya una vieja noción en la época de Lamarck. Por lo tanto, no era inverosímil.

La teoría de la evolución por selección natural de Darwin difería de la de Lamarck. Abandonaba la hipótesis injustificada de que los organismos recibían del entorno sus órdenes de marcha, como si estuviesen ligados a sus cambios por un cordón umbilical oculto o dirigidos por una mano invisible. Darwin se dio cuenta de que el entorno era un constructo extraordinariamente complicado, consistente en todo tipo de influencias diferentes. No hay ninguna razón por la que sus caprichos debieran estar ligados a los que tienen lugar dentro de un organismo. Él veía que cuando se producían cambios dentro de un entorno, el resultado era que algunos organismos se encontraban capaces de defenderse en el nuevo entorno, mientras que otros no lo hacían. Los primeros sobrevivían, transmitiendo los rasgos que los capacitaban para sobrevivir, y los últimos desaparecían. De esta manera, aquellos rasgos que ayudaban a la supervivencia, y podían heredarse, eran transmitidos de forma preferente. A este proceso se le denominó «selección natural». No puede garantizar que la siguiente generación sobrevivirá; si ocurren cambios adicionales en el entorno que sean tan drásticos que ningún residente en el mismo puede afrontarlos, entonces puede seguir una extinción. La esencia de esta imagen es que el hábitat presenta simplemente problemas desafiantes para los organismos, y los únicos recursos disponibles para su solución deben encontrarse en la variación de las capacidades entre una población que se reproduce. Si el entorno cambia durante un largo período, entonces la supervivencia preferente de los miembros de una especie que tienen en mayor medida los atributos que los adaptan mejor para afrontar los cambios ambientales dará como resultado un cambio gradual en la especie. Como resultado, nuevas especies pueden emerger. Los supervivientes estarán mejor adaptados, en promedio, que sus competidores fracasados; pero no hay ninguna razón por la que sus adaptaciones debieran ser las mejores posibles cuando se juzgan por un patrón matemático de eficiencia estructural o funcional. La perfección

podría ser un lujo muy caro, y prácticamente imposible en un ambiente que está cambiando continuamente.

El contraste entre la evolución lamarckiana y la evolución darwiniana es evidente. Mientras que Lamarck imaginaba que los organismos generarían adaptaciones en respuesta a los problemas ambientales que encontraran, Darwin veía a los organismos desarrollando todo tipo de rasgos, inicialmente al azar, antes de que hubiese ninguna necesidad de ellos. No había ninguna mano invisible en acción que generara solamente las variaciones que serían necesarias para afrontar los requisitos futuros. Darwin llamó a este proceso «evolución por selección natural». Fue descubierto también, independientemente, por Alfred Russel Wallace. Cuando Darwin publicó las pruebas detalladas en apoyo de su propuesta en 1859 no sabía cómo podría aparecer la variación de los rasgos en los seres vivos o cómo podrían transmitirse a la descendencia unos rasgos específicos, perpetuando con ello a los que podían enfrentarse al entorno existente. El trabajo de Gregor Mendel, realizado entre 1856 y 1871, descubrió factores heredables (que ahora llamamos «genes») que transmiten información orgánica de una generación a la siguiente. Aunque se podría haber pensado que los rasgos heredados serían siempre tan sólo un promedio de los de los padres de un organismo, resultó que no era así. Algunas características específicas podían ser heredadas intactas o incluso almacenadas sin expresarse sólo para aparecer en generaciones posteriores. Durante el siglo XX, las ideas pioneras de Mendel se desarrollaron en la disciplina de la genética y luego dieron lugar a la biología molecular, que se propone elucidar cómo la información genética es almacenada, transmitida y expresada por moléculas de ADN. La fusión del concepto de evolución por selección natural y las ideas sobre los medios por los que la información genética es almacenada, expresada y heredada por los seres vivos ha llegado a conocerse como la «síntesis moderna».

Creemos que la evolución darwiniana tiene sólo tres requisitos:

- La existencia de variaciones entre los miembros de una población. Pueden ser en estructura, en función o en comportamiento.
- La probabilidad de supervivencia, o de reproducción, depende de dichas variaciones.
- Debe existir un medio de heredar características, de modo que hay una correlación entre la naturaleza de los padres y su progenie. Las variaciones que contribuyen a la probabilidad de supervivencia de los padres serán así heredadas con más probabilidad.

Habría que resaltar que bajo estas condiciones la evolución no es una opción. Si una población tiene estas propiedades, entonces tiene que evolucionar. Más aún, los tres requisitos podrían satisfacerse de muchas maneras diferentes. Las variaciones podrían ser en constitución genética o en la capacidad para entender conceptos abstractos; el mecanismo de herencia podría ser social, cultural o genético. Además, aunque la fuente inicial de variación puede contener un elemento que sea independiente del entorno, habrá en general una interrelación complicada entre las fuentes de variación y el entorno. Una influencia exterior sobre el entorno puede llevar a la supervivencia preferente de individuos con rasgos particulares, pero dichos miembros pueden tener una influencia particular sobre el desarrollo posterior del hábitat. Además, el concepto del entorno de un organismo no carece de ambigüedad, pues incluye a otros organismos y las consecuencias de sus actividades. Sólo si el entorno es extraordinariamente estable, este acoplamiento complicado entre organismos y entorno tendrá poca importancia. Más adelante en este capítulo veremos que existen hábitats muy restrictivos que no son alterados por sus habitantes.

¿Cuál es el resultado a largo plazo de la evolución por selección natural? Sobre esta cuestión hay división de opiniones. Algunos mantienen que la evolución de un sistema suficientemente complejo no tiene fin. Todas las especies seguirán cambiando incluso si su adaptación relativa sigue siendo la

misma. Para este estado de cosas se ha acuñado el término «carrera de ratas». Alternativamente, la evolución podría aproximarse a un estado de equilibrio en el que cada organismo mostraría una serie de rasgos y comportamientos (llamado «una estrategia evolutivamente estable»), y cualquier desviación de la misma rebajaría la probabilidad de su supervivencia. En esta segunda imagen, la evolución podría cesar en un entorno invariable o en uno en donde todos los cambios ambientales fueran inocuos. Los intentos por investigar cuál de estos escenarios a largo plazo debería aparecer en general han encontrado que es necesario considerar por separado aquellos rasgos que están sujetos a una restricción global. Estas restricciones podrían ser estructurales —no se pueden llevar trozos de alimento más pesados de un cierto valor sin venirse abajo; no se puede correr más rápido de un cierto límite; no se puede crecer demasiado y seguir volando—. Estas restricciones ponen límites precisos a la carrera de ratas en ciertas direcciones. Por el contrario, los rasgos no restringidos pueden aumentar o disminuir indefinidamente sin comprometer otras capacidades. Con el tiempo, los rasgos no restringidos de los organismos tienden a terminar en carreras de ratas con otras especies, mientras que los restringidos por retroalimentación negativa terminan en un equilibrio que está caracterizado por una estrategia evolutivamente estable.

A partir de este esbozo de la teoría de la evolución por selección natural sería demasiado precipitado concluir que todos los rasgos y comportamientos mostrados por los seres vivos deben ser adaptaciones beneficiosas a algún aspecto del entorno natural o que deben optimizar las probabilidades de supervivencia en presencia de competidores que dependen de los mismos recursos. Hay un peligro de convertir la biología evolutiva en un «así debe ser» si simplemente presuponemos que todos los aspectos de los seres vivos deben ser soluciones óptimas a problemas particulares planteados por el entorno. Por desgracia, la situación no es tan simple. Aunque un entorno suele plantear problemas estructurales bien definidos, pueden ocurrir

cambios que no estén gobernados por selección natural. Pueden ocurrir cambios en una población debido a fluctuaciones puramente aleatorias en la constitución genética de los organismos. Si dos especies poco numerosas difieren sólo de forma muy ligera en su grado de adaptación, entonces es posible que la especie que estimaríamos más adaptada, en promedio, se extinga como resultado de una pequeña variación azarosa en su constitución genética que contrapese la tendencia sistemática creada por la selección natural. Cuando una población es pequeña es especialmente susceptible a la influencia dominante de la constitución genética de sus miembros originales (el «efecto Adán y Eva») y esto puede contrapesar la influencia de la selección natural. Para complicar aún más las cosas, algunas variaciones genéticas son selectivamente neutras en los entornos en los que surgen y por ello no estarán sujetas a selección. Podrían ser simplemente efectos colaterales de un aumento o una disminución del tamaño de los organismos, por ejemplo. Análogamente, puede haber estrategias diferentes que ofrezcan ventajas indistinguibles para el organismo. Es decir, pueden existir soluciones diferentes pero igualmente efectivas al mismo problema; el hecho de que se escogiera una antes que otra podría deberse a un «efecto Adán y Eva» o sólo a una elección inicial accidental. Quizá, por ejemplo, no hay ninguna ventaja adaptativa en tener nuestro corazón en el lado izquierdo de nuestro tórax; el lado derecho parecería igual de bueno. Finalmente, un rasgo podría ser difícil de interpretar correctamente como una adaptación, porque un único cambio genético podría expresarse como dos rasgos diferentes del organismo. Uno podría ser ventajoso para la supervivencia y el otro desventajoso. Si el efecto neto es ventajoso, entonces el segundo rasgo, negativo, podría persistir en generaciones futuras. Los organismos son paquetes de comportamientos, algunos de los cuales son ventajosos, otros neutros y otros desventajosos. Lo que determina su probabilidad de supervivencia es el nivel global de adaptación que confieren con respecto al que poseen los competidores en el mismo entorno.

Así pues, si un organismo muestra un comportamiento particular o posee alguna característica estructural, ello no significa necesariamente que éste sea el comportamiento óptimo o la estructura óptima requerida para afrontar algún problema ambiental. Puede serlo, como es el caso con los perfiles hidrodinámicos de muchos peces; pero en otros casos, como cuando consideramos por qué hay camellos con una joroba o con dos, quizá no exista tal adaptación óptima en absoluto. La Naturaleza es extraordinariamente económica con los recursos: sobreadaptaciones dispendiosas para afrontar un desafío aumentarán la probabilidad de adaptaciones inadecuadas en otro lugar. Asimismo, los comportamientos pueden ser altamente adaptativos sin surgir de selección. Por ejemplo, es altamente adaptativo volver al suelo después de haber dado un salto en el aire, pero esto ocurre debido a la ley de gravitación; no tiene nada que ver con la selección[5].

Si a pesar de todas estas salvedades uno quiere ofrecer explicaciones para estructuras coordinadas complejas, es en la selección natural donde debe buscar primero. La deriva aleatoria o los caprichos de la situación inicial pueden alterar comportamientos sencillos durante un tiempo, pero no van a ofrecer explicaciones plausibles para sistemas vivos complicados de gran complejidad y estabilidad.

Nuestras acciones no están predeterminadas por los resultados del principio de selección natural. Irónicamente, nuestra constitución genética nos ha permitido crecer lo suficiente y desarrollar cerebros suficientemente complejos, para manifestar conciencia. La información genética por sí sola es

[5] Un malentendido sorprendentemente habitual consiste en creer que la Naturaleza produce adaptaciones perfectas, presumiblemente porque con frecuencia las produce muy buenas. Una hipótesis similar aparece en el argumento de Roger Penrose, en *La nueva mente del emperador,* según el cual el teorema de Godel impide que la mente humana sea un algoritmo computacional, *si es infalible.* Sin embargo, creo que la conclusión correcta a extraer de este argumento (ignorando otras objeciones) es que, puesto que la mente no es un dispositivo lógico perfecto, el teorema de Godel no nos dice nada sobre limitaciones en sus capacidades. No hay razón por la que la selección natural debiera dotamos de cerebros infalibles. Nuestros procesos de pensamiento muestran evidencia de todo tipo de inconsistencias. La capacidad lingüística —que es mucho más impresionante que la capacidad matemática y de mucha mayor importancia adaptativa— no ofrece ninguna evidencia de ser un sistema lógico perfecto.

insuficiente para especificar la naturaleza y los frutos de la conciencia humana. Pese a todo, de ella fluye un enorme aparato de estructuras individuales y sociales, de donde derivan la mayor parte de las acciones humanas y muchas de las partes más importantes del entorno humano. Utilizando signos y sonidos para transmitir información hemos sido capaces de puentear el lento proceso de la selección natural, que está limitado por los tiempos de vida de los miembros individuales de la especie. También está limitado a transmitir generalidades, antes que informaciones específicas sobre la geografía local, el clima, los lugares donde encontrar alimento y similares. Por supuesto, la posesión de cerebros suficientemente sofisticados para aprender de la experiencia, en lugar de responder meramente a la programación genética, no se da a cambio de nada. Requiere una enorme inversión de recursos comparada con el simple desarrollo de respuestas genéticas instintivas. También corre el riesgo de error y falsa evaluación de una manera que no lo hacen las reacciones instintivas, a menos que el entorno cambie con una rapidez inesperada. Con la imaginación viene el riesgo, pero los beneficios lo compensan sobradamente. En un ambiente precario y rápidamente cambiante, la única forma de hacer probable la supervivencia es predecir lo que podría ocurrir y planear diversas alternativas. Tenemos la capacidad de cambiar nuestro comportamiento y responder a cambios debilitadores en el entorno (no utilizando CFC en aerosoles, por ejemplo). Estos cambios de comportamiento no son genéticamente heredables; sin embargo, somos capaces de transmitir esta información, de forma escrita o audible, así como de puentear las largas escalas de tiempo requeridas para la herencia genética. Además, estos métodos de transferencia de información ofrecen posibilidades para la corrección y la revisión continuas a la luz de las circunstancias variables y el conocimiento creciente. La pluma es más poderosa que la espada.

Después de Babel. Una digresión lingüística

Podría haber habla entrecortada sin pensamiento.
Tendría que ser pensamiento anterior a pensamiento estructurado. Una vez establecida, el habla estructurada podría ser dominada con menos pensamiento.
Una vez dominada, el habla estructurada hace más pensamiento.
FLORIAN VON SCHILCHER Y NEIL TENNANT

Hay un área viva de investigación en donde el dilema de instinto versus comportamiento aprendido es central: el origen del lenguaje. El lenguaje es tan fundamental para nuestra experiencia consciente que no podemos concebir su ausencia. Sin lenguaje estamos atrapados. Mucho de nuestro pensamiento consciente parece habla silenciosa con nosotros mismos. Pero ¿cuál es el origen del lenguaje? Hay dos opiniones extremas y otras muchas entre medias. En un extremo está la idea de que nuestras capacidades lingüística y cognitiva están latentes dentro de nosotros en el nacimiento, después del cual se despliegan poco a poco en una escala de tiempo y con una lógica que está general y universalmente preprogramada. Esa programación es parte de lo que define a un ser humano. En el otro extremo encontramos la creencia de que la mente del niño es una hoja en blanco sobre la que se grabará el conocimiento solamente a través de la interacción con el mundo. La primera de estas ideas sobre el origen del lenguaje ha sido explorada y desarrollada más extensamente por el lingüista americano Noam Chomsky, quien fue el primero en exponerla frente a una gran oposición por parte de antropólogos y científicos sociales a finales de los años cincuenta del siglo XX. La opinión contraria, que nuestra apreciación mental del mundo

está creada enteramente por nuestra interacción con él, se suele asociar con el psicólogo suizo Jean Piaget, quien intentó establecerla sobre una base firme realizando estudios extensivos de procesos de aprendizaje en niños pequeños. Uno de los intereses centrales de Piaget estaba en el proceso por el que los niños llegan a apreciar conceptos matemáticos, geométricos y lógicos gracias a la manipulación de juguetes que llevan información concreta sobre estas abstracciones. Nociones simples como la igualdad de dos cantidades, o que una cantidad sea más grande o más pequeña que otra, la invariancia de objetos cuando son movidos, y similares, se extraen del mundo por una experiencia lúdica. Un tren de juguete, por ejemplo, proporciona una comprensión de la lógica y la geometría, porque su construcción requiere la asimilación de las reglas que gobiernan el empalme de los vagones. Aunque el enfoque de Piaget suena verdadero en relación con muchos aspectos de nuestra experiencia de aprendizaje temprano, la adquisición de habilidades lingüísticas le enfrenta a varios hechos sorprendentes que Chomsky utilizaba en apoyo de su idea de que el lenguaje es un instinto innato.

Aunque los niños están expuestos a la estructura del lenguaje —su gramática y su sintaxis— sólo en un nivel superficial, ellos son capaces de realizar muchas construcciones abstractas y complicadas. La exposición media de un niño de cinco años al lenguaje es insuficiente para explicar su competencia lingüística. Los niños pueden utilizar y comprender frases que nunca han oído antes. Por deficientes que puedan ser en otras actividades, los niños sin minusvalías nunca dejan de aprender a hablar. Su destreza se consigue sin instrucción específica. La cantidad de interacción ambiental que experimentan es insuficiente para explicar su dominio lingüístico. Los niños parecen desarrollar dominio lingüístico con más rapidez entre los 2 y 3 años, independientemente de sus niveles de exposición. Los intentos de los mayores por aprender lenguas extranjeras no tienen el mismo éxito, ni los adultos responden a los mismos procesos educativos. La capacidad de

asimilar como una esponja que tiene un niño parece apagarse a una edad temprana.

El lenguaje parece ser una capacidad con un alcance potencialmente infinito. ¿Cómo puede aparecer a partir solamente de una experiencia del mundo muy limitada y necesariamente finita? Un estudio detallado de la estructura de los lenguajes humanos ha revelado una unidad profunda en sus estructuras gramaticales en un grado tal que un visitante del espacio exterior podría concluir, en cierto nivel, que todos los seres humanos hablan dialectos diferentes del mismo lenguaje.

Para Chomsky, el lenguaje es una capacidad cognitiva particular innata en los seres humanos. Nuestros cerebros contienen un «cableado» neural genéticamente programado que predispone al estudiante a dar los pasos que llevan al lenguaje. Este «cableado» inicial del cerebro es algo que comparten los miembros de nuestra especie. Cuando nos exponemos por primera vez a un ambiente en el que se está hablando una lengua, es como si se fijaran ciertos parámetros en dicho programa incorporado, y el programa realiza entonces el vocabulario, la gramática y la sintaxis del lenguaje que oímos. El alcance, y el nivel de sofisticación que resultará de este proceso, variará de una persona a otra y será muy sensible a ligeras variaciones en la experiencia. Por esto es por lo que los niños se adaptan y asimilan el lenguaje con tanta facilidad. En el fondo, Chomsky argumentaba que el lenguaje no es una invención humana. Es innato a la naturaleza humana, igual que saltar es innato a la naturaleza del canguro. Pero lo que es innato es un tipo de programa, que se ejecuta en respuesta a estímulos externos. Cómo tiene lugar ese desarrollo es tema de mucha controversia e investigación[6].

Para Chomsky, la adquisición del lenguaje por un niño es tan sólo uno más de los muchos elementos de preprogramación genética que le equipan para

[6] No ha cambiado mucho desde 1866 cuando la cuestión del origen del lenguaje estaba generando tantas especulaciones infundadas que la Sociedad Lingüística de París prohibió su discusión.

pasar de la infancia a la pubertad y a la edad adulta. Antes de sus propuestas, los lingüistas habían centrado la atención en construir las gramáticas de tantas lenguas humanas como fuera posible (se conocen casi tres mil). Chomsky volvió las cosas del revés. Partiendo de la hipótesis de que la mente está en posesión de una «gramática universal» desconocida, que tiene parámetros variables que pueden fijarse de maneras diferentes para lenguas diferentes, la búsqueda consistía en descubrir la gramática universal subyacente a partir de estudios de las lenguas particulares que surgen de ella. Chomsky advirtió que tenemos una sensación intuitiva de la estructura formal del lenguaje que es independiente de su significado. Nos presenta una frase «Las ideas verdes incoloras duermen furiosamente»[7]. Vemos esto como un fragmento de inglés sin significado, pero sentimos que su gramática y su forma parecen correctas. Las categorías de pensamiento que delinean la forma pueden existir independientemente de la necesidad de abordar el significado. Son estas categorías formales las que Chomsky veía como la clave del lenguaje, y su programa de investigación estaba dedicado a aislar los ingredientes formales básicos que constituyen la gramática universal que hay tras todas las lenguas.

Piaget presenta la inteligencia humana como algo que procesa información del mundo exterior y poco a poco construye un modelo de realidad que se hace más sofisticado conforme atravesamos la infancia. Él apela a este proceso interactivo como base para la adquisición de todas nuestras habilidades cognitivas. Por el contrario, Chomsky parece negar este papel activo de la mente, al considerarla un receptor de información pasivo. El niño no recibe de una vez por todas una impresión de cómo son las cosas realmente, sino que fija los parámetros de un programa preexistente en la

---

[7] No hace falta decir que esto provocó intentos de inyectar significado contextual al ejemplo de Chomsky. Un verso de «Coiled Alizarine», de John Hollander, está dedicado a Noam Chomsky:
Curiosamente profundo es el sueño de las ideas carmesí:
mientras que jadeantes, en pesado viridiano,
las ideas verdes incoloras duermen furiosamente.

mente. Nuestra preprogramación lingüística es única para su propósito, más que ser parte de una programación más general para resolver problemas de todo tipo, como afirmaba Piaget. Es esta última afirmación la que hacía difícil de defender la posición de Piaget. Si la adquisición del lenguaje es tan sólo otra parte de nuestro desarrollo de la capacidad de resolver problemas, ¿por qué es en la práctica tan distinta? Tenemos pocas dificultades en aprender cualquier otro tipo de procedimiento y adquirir otras habilidades hasta una edad mediana y más lejos, pero nuestras capacidades instintivas de adquisición del lenguaje no persisten más allá de la temprana infancia. Una vez que han aprendido su lengua nativa, ajustando los «botones de mando» en su programa universal innato, los lingüistas de talento se distinguen por su capacidad para cambiar los botones y aprender otras lenguas —aunque no las aprenden de la misma manera en la que un niño adquiere su primera lengua.

Si suponemos que nuestras mentes poseen cierto tipo de cableado para la adquisición del lenguaje, es apropiado preguntar si podemos reducir la naturaleza de dicho cableado. El lingüista Derek Bickerton ha sugerido que no estamos simplemente cableados con una gramática universal y botones ajustables cuyas posiciones se fijan al oír una lengua. En su lugar, estamos cableados realmente con algunos de estos botones ya fijos. Éstos permanecen así hasta que son reajustados por la lengua que el niño oye hablar en su entorno. Lo interesante de esta idea es que permite realizar algunos tests. Si el niño crece en una cultura en la que el lenguaje hablado es una mezcla primitiva de jergas, entonces los botones iniciales no serán reajustados y persistirán. Hay evidencia de que los botones iniciales están fijados para una simple forma lingüística mestiza. Errores típicos de gramática y ordenación de palabras, como negaciones dobles, persisten entre niños pequeños, y son característicos de la forma mestiza. Los hablantes regresan así a gramáticas mestizas innatas si no han sido expuestos a una gramática local que reajuste sus «conmutadores»

lingüísticos a la nueva forma. Si el niño no oye ningún lenguaje sistemáticamente estructurado, sino que crece en medio de un conjunto de jergas sin estructurar, entonces los botones originales criollos tenderán a persistir y se harán más difíciles de cambiar con el paso del tiempo.

Finalmente, podríamos añadir que Chomsky mantiene una actitud ambigua hacia el origen de nuestra gramática universal. Aunque hay fuerte evidencia de que el lenguaje es instintivo, y no un comportamiento aprendido, todavía tenemos que explicar el origen de la gramática universal, determinar si es una entre muchas posibilidades y descubrir el proceso paso a paso mediante el que evolucionó a partir de sistemas más primitivos de sonidos y signos. Hasta ahora ha habido pocos progresos al abordar dichos problemas. En términos generales, podemos ver que el lenguaje es adaptativo: confiere enormes ventajas a sus usuarios. Una vez que se convirtiera en una posibilidad genética, habría una enorme presión para su propagación y una selección para su mejora. No obstante, será probablemente muy difícil reconstruir la secuencia precisa de pasos evolutivos, porque para ser efectivo el lenguaje requiere una combinación de diseños anatómicos que coincidan con la programación cerebral.

Una sensación de realidad. La evolución de las imágenes mentales

Los seres humanos son lo que ellos mismos entienden que son; están compuestos enteramente de creencias sobre sí mismos y sobre el mundo en que habitan.

MICHAEL OAKESHOTT

La idea de Kant de que nuestra concepción del mundo está separada de su realidad por nuestro aparato cognitivo debe modificarse a la luz de lo que hemos aprendido sobre la evolución de organismos y entornos. También la

cognición está sujeta a evolución. Platón reconoció por primera vez que la «observación» implica hacer algo. Nuestros sentidos están ya en su sitio antes de que reciban sensaciones. Pero esta idea potencialmente profunda iba seguida de una afirmación menos convincente, según la cual nuestro conocimiento instintivo de las cosas surgió porque poseíamos un conocimiento previo de los planos de cualquier objeto concreto que pudiéramos encontrar en el mundo. Ésta es una forma extraordinariamente poco eficiente de diseñar un sistema. Kant era más económico: él no quería dotamos con un conocimiento instalado de todo objeto particular, sino sólo de categorías y modos generales de comprensión. Utilizando estas categorías podríamos construir conceptos de las cosas, igual que podríamos construir edificios a partir de ladrillos. Estas categorías de pensamiento innatas se suponían universales para todos los seres humanos sin impedimentos. Pero ¿por qué debería ser así? Puesto que Kant no podía decir de dónde proceden estos casilleros mentales, no podía estar seguro de que no empezaran a cambiar repentinamente o que no difirieran de una persona a otra.

En la naturaleza de las cosas hay una verdad fundamental que nosotros apreciamos ahora, pero que Kant no hizo. Nosotros sabemos que el mundo no apareció ya hecho. Está sujeto a fuerzas de cambio inevitables. Esta visión de las cosas empezó a emerger durante el siglo XIX. Los astrónomos empezaron a describir cómo podría haber nacido el sistema solar a partir de un estado anterior más desordenado; los geólogos empezaron a entender la evidencia del registro fósil; los físicos se hicieron conscientes de las leyes que gobiernan los cambios que pueden darse en un sistema físico con el paso del tiempo. Pero la contribución más importante fue la de Darwin, y se ha hecho evidente que tiene cosas importantes que enseñamos, no simplemente sobre las moscas de la fruta y los hábitats animales, sino sobre las profundas preguntas de Kant concernientes a la relación entre realidad y realidad percibida.

Una consideración del proceso evolutivo que ha acompañado el desarrollo de la complejidad viviente disipa algunos de los misterios de por qué compartimos categorías de pensamiento similares: por qué tenemos muchas de las categorías que tenemos y por qué permanecen constantes en el tiempo. Pues estas categorías han evolucionado, junto con el cerebro, por el proceso de selección natural. Este proceso selecciona aquellas imágenes del mundo que modelizan con más exactitud el carácter de su verdadera realidad subyacente en la arena de la experiencia donde ocurre la adaptación. La biología evolutiva presta así apoyo a una perspectiva realista sobre una parte importante del mundo: esa parte cuya aprehensión correcta es ventajosa. Muchas de estas aprehensiones no nos dan simplemente ventajas sobre otros que las poseen en menor grado: son condiciones necesarias para la existencia continuada de cualquier forma de complejidad viviente. Mentes que nacieran espontáneamente con imágenes del mundo que no correspondieran a la realidad no podrían sobrevivir. Esas mentes contendrían modelos mentales del mundo que se mostrarían falsos al enfrentarse a la experiencia. Nuestras mentes y nuestros cuerpos expresan información sobre la naturaleza del entorno en el que se han desarrollado, nos guste o no. Nuestros ojos han evolucionado como receptores de luz por un proceso adaptativo que responde a la naturaleza de la luz. Su estructura nos dice cosas sobre la verdadera naturaleza de la luz. No hay lugar para una visión según la cual todo nuestro conocimiento de la luz no es otra cosa que una creación mental. Precisamente porque es una creación de nuestra mente, nuestro conocimiento de la luz contiene elementos de una realidad subyacente. El hecho de que poseamos ojos testimonia la realidad de algo que llamamos luz.

Aunque no sabemos si estamos solos en el Universo, es seguro que no estamos solos en la Tierra. Hay otros seres vivos con diversos niveles de «conciencia» que se reflejan en la sofisticación de los modelos mentales que son capaces de crear acerca del mundo que les rodea. Algunas criaturas

pueden crear un modelo que puede simular el futuro bajo la hipótesis de que se desarrollará de una forma idéntica a como lo ha hecho a partir de circunstancias similares en el pasado. Otras criaturas, como los cocodrilos, carecen de esta capacidad para unir pasado, presente y futuro, y viven en un presente eterno. Todas las plantas y todos los animales han codificado un modelo o han encarnado una teoría sobre el universo que los equipa para la supervivencia en el entorno del que han tenido experiencia. Dichos modelos varían mucho en sofisticación. Sabemos que una hormiga está genéticamente programada para realizar ciertas actividades dentro de su colonia. Posee un modelo sencillo de un pequeño fragmento del mundo. Los chimpancés poseen un modelo de realidad mucho más sofisticado, pero sabemos que en cualquier caso es una abreviación drástica de lo que podemos saber sobre el mundo. Podríamos colocar a un chimpancé en una situación que estuviera más allá de su capacidad de comprender con éxito —por ejemplo, en los controles de un simulador de vuelo—. Aunque nuestras propias imágenes mentales del mundo son más sofisticadas que las de cualquier otra forma de vida terrestre, no son ni mucho menos completas. Lo notable es que sean suficientemente completas para reconocer que deben ser incompletas. Sabemos que cuando miramos una silla recibimos sólo parte de la información sobre ella que está disponible para los observadores. Nuestros sentidos son limitados. «Vemos» sólo algunas longitudes de onda de la luz; «olemos» sólo una gama de olores; «oímos» sólo un intervalo de sonidos. Si no vemos nada, esto no significa que no haya nada ahí. El alcance de nuestros sentidos, tanto cuantitativa como cualitativamente, es también el resultado de un proceso de selección que debe aprovechar recursos escasos. Podríamos haber desarrollado ojos que fueran miles de veces más sensibles, pero dicha capacidad habría tenido que pagarse utilizando recursos que no podrían haberse utilizado en otras cosas. Hemos terminado con un paquete de sentidos que hace un uso eficiente de los recursos disponibles.

Pese a la fuerza del soporte evolucionista a una visión generalmente realista de las cosas, debemos tener cuidado en no afirmar demasiado. Ya hemos visto que algunas características de los organismos pueden existir como subproductos inocuos de adaptaciones a otros propósitos. Lo mismo sucede con nuestras imágenes de la realidad. Más aún, nos encontramos en posesión de todo un conjunto de capacidades que no tienen ninguna ventaja selectiva obvia. Wallace, el codescubridor de la teoría de la evolución, no reconoció esta sutileza y concluyó que muchas capacidades humanas eran inexplicables sobre la base de la selección natural. Pero Darwin fue capaz de apreciar el hecho de que somos conjuntos de capacidades, adaptaciones anticuadas y subproductos inocuos. El distinguido biólogo teórico John Maynard Smith argumentaba que

> *Es un hecho sorprendente que, aunque Darwin y Wallace llegaron independientemente a la idea de evolución por selección natural, Wallace nunca siguió a Darwin en dar el paso adicional de afirmar que la mente humana era también un producto de la evolución... [Stephen Jay Gould sugiere que esto fue]... porque Wallace tenía una idea demasiado simplista de la selección, según la cual toda característica de cualquier organismo es el producto de la selección, mientras que Darwin era más flexible y reconocía que muchas características son accidentes históricos de los corolarios no seleccionados de algo que ha sido seleccionado. Ahora hay características de la mente humana que son difíciles de explicar como productos de la selección natural: pocas personas han tenido más hijos porque fueran capaces de resolver ecuaciones diferenciales o jugar al ajedrez a ciegas. Por lo tanto, Wallace fue llevado a la idea de que la mente humana requería un tipo de explicación diferente, mientras que Darwin no encontró ninguna dificultad en pensar que una mente que evolucionó porque podía*

entender la complejidad de la vida en las sociedades humanas primitivas mostraría propiedades impredecibles y no seleccionadas.

Aunque podemos entender qué nociones clave, como las de causa y efecto, son necesarias para una evolución acertada por selección natural, no es tan fácil ver por qué las imágenes mentales de las partículas elementales o los agujeros negros deberían estar aseguradas de la misma manera. ¿Qué valor de supervivencia puede atribuirse a la comprensión de la relatividad y la teoría cuántica? Los seres humanos primitivos evolucionaron con éxito durante centenares de miles de años sin ninguna noción de estos aspectos de la estructura profunda del Universo. Pero estos conceptos esotéricos son meramente conjuntos de ideas mucho más simples unidas de formas complicadas. Esas ideas más simples tienen un alcance mucho mayor y son útiles para evaluar un vasto abanico de fenómenos naturales. Nuestro conocimiento científico sofisticado podría verse como un subproducto de otras adaptaciones para el reconocimiento del orden y la forma en el entorno. Es evidente que la apreciación artística está íntimamente relacionada con esta propensión. Pero una susceptibilidad para reconocer pautas y atribuir orden al mundo es un impulso poderoso. La abundancia de mitos, leyendas y pseudoexplicaciones del mundo testimonia una propensión que tenemos a inventar principios ordenadores espurios para explicar el mundo. Tenemos miedo de lo inexplicado. Caos, desorden y azar estaban íntimamente ligados a un lado oscuro del Universo: eran la antítesis de los dioses benevolentes. Una razón para ello es que el reconocimiento del orden ha pasado de tener una recompensa que es beneficiosa —reconocer fuentes de alimento, predadores o miembros de la misma especie— a ser un fin en sí mismo. Hay una satisfacción que ganar de la creación de orden o del descubrimiento del orden. Estas sensaciones tienen su origen probablemente

en un pasado evolutivo, donde la capacidad para hacer tales identificaciones era adaptativa.

Puesto que nuestras mentes y sensibilidades han evolucionado en respuesta a un proceso selectivo que recompensa la correspondencia con lo que es el mundo, cabe esperar que encontremos variaciones en aquellos atributos mentales restringidos o implicados por algunos aspectos de la estructura subyacente del Universo. El entorno en el que hemos evolucionado es más profundo que el mundo superficial de otros seres vivos. Brota de las leyes y constantes de la Naturaleza que determinan la propia forma y tejido del Universo. La complejidad de nuestras mentes y cuerpos es reflejo de la complejidad del entorno cósmico en el que nos encontramos. La naturaleza del Universo ha dejado su sello en nosotros, restringiendo nuestras sensibilidades de maneras sorprendentes e inesperadas.

El cuidado y mantenimiento de un pequeño planeta. Ambientalismo cósmico

La oración del teórico: «Señor, perdóname el pecado de arrogancia, y, Señor, por arrogancia entiendo lo siguiente...».

LEON LEDERMAN

El proceso evolutivo asegura que nos hemos convertido en encarnaciones de muchos aspectos de nuestro entorno cuya existencia es necesaria para nuestra supervivencia. Pero ¿cuál es exactamente este entorno? Hace tiempo que los biólogos nos han enseñado cómo el clima inmediato, la topografía y los recursos disponibles determinan las condiciones en que ocurre la evolución. En años recientes nos hemos hecho conscientes de condiciones más generales que aseguran todas y cada una de las formas de vida en la

Tierra. Conforme la expansión y la influencia humanas han crecido hasta niveles que ponen en peligro la estabilidad del ambiente terrestre global, hemos descubierto que el origen y la persistencia de la vida deben mucho a un equilibrio invisible que es profundo y delicado. Lo irónico es que sólo hemos llegado a conocer muchos aspectos de este equilibrio cuando nos hemos desviado involuntariamente del mismo. El crecimiento de la producción tecnológica y sus productos residuales han empezado a cambiar el clima de la Tierra. Cuando descubramos si esto es una tendencia sistemática, antes que una fluctuación de corta vida, podría ser demasiado tarde para hacer algo para remediarlo. Otras actividades humanas han generado gases residuales que alteran los procesos químicos que controlan la abundancia de ozono en la atmósfera. A medida que se adelgace la capa de ozono, nos encontraremos expuestos a una intensidad de luz ultravioleta contra la que no nos equipó el lento proceso de evolución. La reducción de la capa de ozono acelerará el daño a las células humanas e incrementará la incidencia de cánceres de piel letales. También hay influencias insospechadas cuyo origen está más allá de los límites de nuestro sistema solar. En 1992, los medios de comunicación de todo el mundo difundieron excitados las predicciones de que, después de fallar por poco en esta vuelta, el cometa Swift-Tuttle regresaría el 14 de agosto de 2126 e impactaría en la Tierra: un suceso que supondría el final de la vida humana. De hecho, se ha argumentado que impactos anteriores de detritus procedentes del espacio han desempeñado un papel principal en las extinciones en masa de vida en la Tierra que están inscritas en el registro fósil. Es ahora generalmente aceptado que la colisión de un cometa o un meteoro contribuyó a la extinción en masa de hace 65 millones de años en la que desaparecieron los dinosaurios. El polvo y los detritus del impacto ascendieron a la alta atmósfera, ocultando la superficie del planeta a los rayos del Sol por un período suficientemente largo para acabar con todas las plantas sobre las que descansaba la cadena alimenticia. Otras extinciones ocurrieron en otras

épocas. Paradójicamente, tales extinciones catastróficas pueden haber sido un precedente necesario para nuestra propia evolución rápida hacia la vida sintiente, porque cuando el medio ambiente se recupera de estas catástrofes parece haber un florecimiento de la diversidad de vida. Al limpiar el escenario ecológico, las extinciones abren un gran número de nichos ambientales no ocupados y quitan el freno al proceso evolutivo. A ello le sigue un período de rápida diversificación antes de que las limitaciones usuales de la sobrepoblación y la escasez de recursos se impongan de nuevo. Uno puede ser a veces testigo de esta rápida expansión en nichos vacíos en una escala local más pequeña. Hace algunos años, el sureste de Inglaterra fue devastado por un huracán sorpresa que generó vientos con velocidades nunca antes registradas en las islas Británicas. En los condados de Sussex y Kent, regiones enteras de bosques desaparecieron de la noche a la mañana. Stanmer Woods, en el límite de la Universidad de Sussex, fue especialmente golpeado. Un día, miraba por mi ventana y veía un inmenso y viejo olmedo; al día siguiente, sólo un horizonte desnudo cubierto de troncos partidos, ramas desgarradas y hojas caídas. Cuando la madera fue quemada o retirada, los bosques parecían estériles y desolados, pero con el paso del tiempo ha aparecido una nueva y gran diversidad de flores, árboles jóvenes y arbustos. La desaparición de los árboles permitió que la luz penetrara hasta el suelo, hubiera más humedad en el suelo y se creara espacio para que crecieran otras cosas. Por supuesto, ninguna especie fue llevada a la extinción por la tormenta, pero la forma en que el bosque se ha recuperado con sorprendente rapidez de una destrucción en masa de árboles y pérdida de aves pone de manifiesto una rica diversidad que constituye un microcosmos de la recuperación de la Tierra entera tras ocasionales catástrofes ecológicas hace millones de años.

En una primera aproximación, la vida *se extingue.* Más del 99 por 100 de todas las especies que han vivido alguna vez han seguido el camino de los dinosaurios. La batalla constante entre éxito reproductivo y desaparición sólo

ha favorecido ligeramente al primero. Antes de la extinción de los dinosaurios, los mamíferos habían sido bastante pocos y muy diseminados, y la mayoría de ellos parecidos a las musarañas. Poco después, en tan sólo una docena de millones de años surgió prácticamente toda la enorme diversidad actual de mamíferos, desde los ratones hasta los elefantes.

El registro fósil muestra que, si el ritmo al que parece haber aparecido la diversidad en la frontera Precámbrico-Cámbrico hubiera continuado intacto hasta el presente, entonces los océanos contendrían más de 10^{27} especies marinas diferentes, en lugar del millón aproximadamente que se estima que hoy existen. Claramente la evolución podría ir mucho más deprisa de lo que lo hace. Presumiblemente está atenuada por el espacio y los recursos limitados que existen para mantener a las diferentes criaturas.

Importantes catástrofes ambientales pueden ser necesarias para que la evolución alcance altos niveles de diversidad y sofisticación en una serie de pasos relativamente rápidos. Si la vida se origina en otros mundos abarrotados, entonces la emergencia de formas de vida complejas puede requerir una sucesión de acontecimientos catastróficos para acelerar el ritmo de la evolución. Sin ellos, la evolución puede frenarse lentamente. Los mundos seguros sin acontecimientos destacados no son necesariamente ventajosos para el proceso de la vida: para vivir de modos complejos, uno tiene que vivir peligrosamente, porque afrontar el peligro requiere la evolución de la complejidad.

Si las extinciones en masa fueran causadas por sucesos locales internos al entorno —algún tipo de enfermedad, por ejemplo— entonces cabría imaginar que el proceso evolutivo produciría más descendencia con resistencia aumentada a tales amenazas, y las extinciones se harían más raras y menos catastróficas. Como resultado, el potencial para un rápido cambio evolutivo y para la innovación estaría suprimido. El reloj de la evolución sólo podría ponerse a cero mediante intervenciones enormes e impredecibles de sucesos catastróficos para los que la evolución genética sistemática no podría

desarrollar resistencia. La única manera de romper este ciclo, y superar los desastres a gran escala, es mediante la producción de un rasgo como la conciencia, que permite que la información sea transmitida mucho más rápidamente que por medios genéticos.

Visto a esta luz, puede ser que el ritmo global de evolución de la vida en la Tierra haya sido influido de forma significativa —y positiva— por sucesos como el cambio climático o los efectos de perturbaciones externas procedentes del espacio. Por supuesto, si nosotros tuviéramos que ser los siguientes candidatos para una extinción en masa producida, digamos, por el impacto de un cometa, nos resultaría difícil adoptar el punto de vista a largo plazo que califica a esta influencia como «positiva». Estos encuentros cósmicos no son tan improbables para que los podamos ignorar por completo. En 1992 supimos de la amenaza del cometa Swift-Tuttle. En julio de 1994, los astrónomos tuvieron la oportunidad de ser testigos de las consecuencias de un impacto cometario muy cerca de nosotros cuando los fragmentos del cometa Shoemaker-Levy 9 golpearon la cara oculta del planeta Júpiter. La energía liberada por los fragmentos de la explosión fue millones de veces mayor que la de las más grandes explosiones nucleares terrestres. Se conocen otras aproximaciones cercanas a la Tierra, lo que ha llevado a un serio debate respecto a cuál sería la mejor forma de desarrollar defensas contra tal bombardeo celeste. Algunos han propuesto que habría que desarrollar una tecnología de Guerra de las Galaxias con la idea de hacer explotar, o desviar, los cometas y los asteroides incidentes cuando todavía se encuentran en el sistema solar externo. Otros creen que la búsqueda de estas armas poderosas crea mayores peligros para la humanidad que los objetos que se pretende destruir. Después de todo, cualquier tecnología suficientemente avanzada para desviar un pequeño cuerpo celeste que se acerca a la Tierra sería capaz, en las manos equivocadas, de desviarlo *hacia* una parte concreta de la superficie de la Tierra.

En ausencia de catástrofes, nuestra propia existencia se hace posible por la presencia de nuestra amable estrella vecina, el Sol. Su estabilidad y su distancia a nosotros aseguran que el ambiente terrestre promedio es relativamente templado: suficientemente frío para que exista agua en estado líquido, pero suficientemente caliente para evitar una interminable era glacial. Pero el Sol no es invariable; sabemos que su superficie muestra estallidos complejos de actividad magnética que produce ciclos regulares de actividad de manchas solares. No existe ninguna explicación completa para dichos ciclos, y su posible influencia sobre el clima de la Tierra sigue siendo un tema de especulación recurrente. El Sol no es la única estrella que podría desempeñar un papel crítico en la estabilidad de nuestro entorno. En 1987, la observación de una estrella en explosión, una supernova, en la Gran nube de Magallanes (una galaxia «enana» cercana en el mismo grupo local de galaxias que nuestra Vía Láctea) excitó a los astrónomos de todo el mundo.

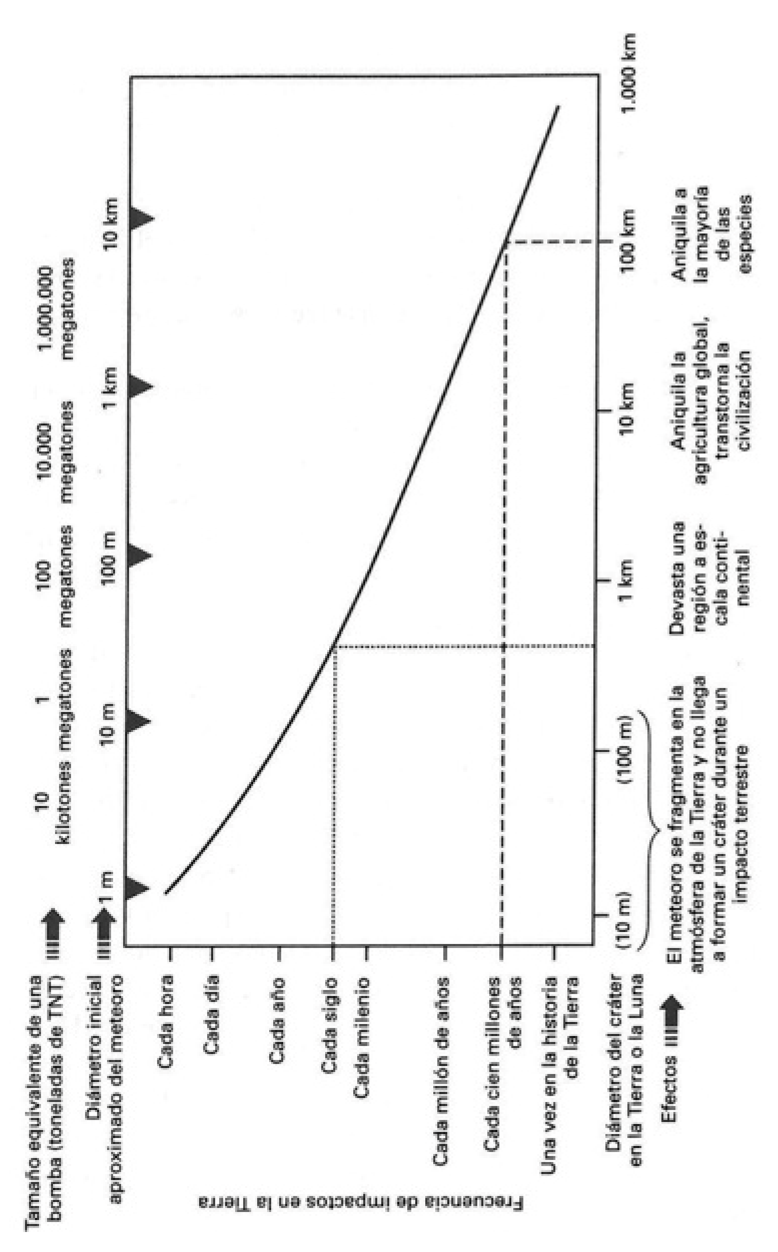


Figura 2.9. Constantes de la Naturaleza. La frecuencia media de impactos en la atmósfera de la Tierra por parte de objetos de diferentes tamaños junto con el tamaño esperado de los cráteres creados en la superficie de la Tierra y sus probables efectos. Basado en fig. 8.1 en P. D. Ward y D. Brownlee, Rare Earth, Copernicus, Nueva York (2000), p. 165.

Si hubiera ocurrido cerca, en nuestra propia galaxia, podría haber extinguido toda la vida terrestre. Es posible que explosiones de supernovas cercanas en el pasado distante produjeran radiación que alterara la capa de ozono de la

Tierra e influyera en el curso de la evolución de las simples formas de vida marina, radicada en arrecifes, que fueron las precursoras de organismos posteriores más complejos.

Cuando contemplamos estos riesgos astronómicos empezamos a apreciar lo azarosa que es la supervivencia a largo plazo en el Universo, tanto para nosotros como para otros. La Figura 2.9 muestra las frecuencias probables de incidencia y las consecuencias energéticas de impactos de tamaño creciente.

El reconocimiento de estos peligros puede ayudamos a entender misterios más profundos de la vida en el Universo. Se han propuesto muchas explicaciones de por qué no hemos encontrado pruebas de la existencia de vida extraterrestre avanzada en el Universo cercano. Quizá seamos demasiado poco interesantes para que valga la pena entrar en contacto con nosotros; quizá seamos demasiado inteligentes para ser perturbados; quizá la vida requiera ambientes extremadamente improbables para sostenerla. Lo más probable, creo yo, es que la vida nunca sobrevive durante períodos de tiempo muy largos. Impactos de asteroides, paso de cometas, estallidos de radiación gamma… todos estos peligros externos son sucesos comunes. Estamos protegidos de muchos de ellos por el planeta Júpiter y nuestra gran Luna. Sin estos escudos gravitatorios habríamos sufrido una serie de impactos catastróficos que habrían servido para poner a cero continuamente el reloj evolutivo. Si se unen estos azares a la amenaza para la vida que presentan los peligros internos como la guerra, la enfermedad o el desastre medioambiental, empezamos a ver que quizá no sea totalmente sorprendente que no haya nadie «ahí fuera» en nuestra parte del Universo.

Estos ejemplos ilustran los riesgos para el ambiente delicado de la Tierra que plantean las influencias cósmicas exteriores. Los factores ambientales que han conformado la evolución de la biosfera de la Tierra pueden tener un impacto errático y súbito, más allá de las posibilidades de supervivencia de la mayoría de las formas de vida terrestres. Pero las catástrofes celestes

pasadas no son nada comparadas con los acontecimientos que aguardan en el lejano futuro. Algún día, unos 5000 millones de años a partir de ahora, el Sol comenzará a morir. Habrá agotado su suministro de hidrógeno que le sirve como combustible nuclear. En sus últimos esfuerzos por ajustarse a esta última crisis energética solar, se expandirá y vaporizará los planetas interiores del sistema solar antes de contraerse hacia un estado de reposo final, con un tamaño tan sólo un poco mayor que las dimensiones actuales de la Tierra. Al principio, ese estado será muy caliente, pero a lo largo de miles de millones de años el Sol se enfriará continuamente, dejando un rescoldo negro que se desvanecerá en la invisibilidad (véase la Lámina 6).

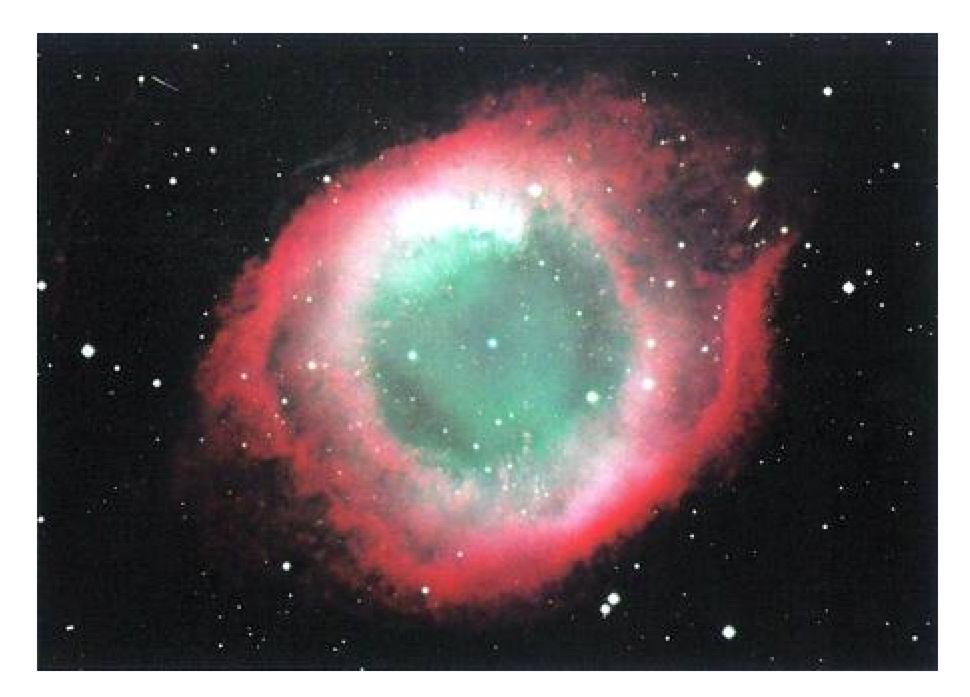


Lámina 6. La nebulosa de la Hélice, a 400 años-luz de la Tierra. Una estrella moribunda ha perdido una capa de material caliente, que se expande hacia fuera, enfriándose y haciéndose más tenue. Finalmente se dispersará y mezclará con el gas y el polvo interestelar.

¿Habrá encontrado para entonces la humanidad un medio de desplazarse a otro lugar? Parece poco probable. Ya es bastante difícil hacer el equipaje

para ir a unas cortas vacaciones con unos pocos miembros de la familia. ¡Imagínese hacer el equipaje para 10 000 millones, ninguno de los cuales piensa regresar![8]

Para bien o para mal, el entorno cósmico se extiende mucho más lejos y es mucho más amplio de lo que Darwin imaginara nunca. La estructura del Universo más allá de la Tierra restringe el ambiente dentro del cual pueden ocurrir los procesos más familiares de la evolución biológica, la adaptación y el desarrollo cultural. Pone límites a la diversidad que es posible en la Tierra y modela nuestras impresiones del mundo. Desarrollando una apreciación de las sutilezas de nuestro entorno cósmico, podemos empezar a distinguir las características que han emergido por azar de las que son consecuencia inevitable de la estructura profunda e inalterable del Universo.

El arco iris de la gravedad. El tejido del mundo

¡Condenado Sistema Solar! Mala luz, planetas demasiado lejanos, peste de cometas, artilugios inadecuados... Yo mismo podría hacerlo mejor.

LORD JEFFREY

Distanciémonos de las minucias de la evolución biológica en la Tierra, donde una enorme complejidad es promovida por un proceso que hemos venido a llamar «competición», por el que cada especie busca realmente un nicho que *minimice* su necesidad de competir con rivales. Toda esta interacción coadaptativa entre organismos y hábitats requiere un telón de fondo. Antes de que los genes puedan ser «egoístas», antes de que la complejidad biológica pueda empezar a desarrollarse deben existir átomos y moléculas

[8] El matemático Greg Chaitin me contó una vez una historia de ciencia-ficción en la que una familia americana, que se mantenía muy aislada de los demás, sale de acampada y cuando regresa descubre que el resto de la especie humana ha dejado el planeta... sin decírselo.

con propiedades que permitan el desarrollo de la complejidad y la autorreplicación, deben existir entornos estables y deben existir lugares suficientemente templados para que dichas estructuras existan. Todas estas cosas deben persistir durante períodos de tiempo enormes.

En la profundidad de los espacios interiores de la materia, invisibles e inadvertidas, existen las características que hacen posible satisfacer estas condiciones. En definitiva, son estas cosas las que permiten que florezca la vida y todas sus consecuencias en nuestro solitario puesto avanzado en los suburbios de una galaxia vulgar denominada Vía Láctea. No garantizan la vida, pero sin ellos sería imposible cualquier estructura suficientemente compleja para evolucionar espontáneamente por selección natural.

Hay cuatro aspectos de la estructura profunda del Universo que se combinan para asegurar el ambiente cósmico dentro del cual la lógica de la selección natural ha permitido que la mano del tiempo modele la complejidad viviente.

Las leyes de la Naturaleza dictan cómo cambia el mundo con el paso del tiempo y de un lugar a otro. Actualmente creemos que dichas leyes gobiernan la actuación de sólo cuatro fuerzas naturales: gravedad, electromagnetismo, la fuerza débil (radioactiva) y la fuerza fuerte (nuclear). Superficialmente, estas fuerzas parecen ser distintas en cuanto a alcance, intensidad e identidad de las partículas de materia que están sometidas a sus inflexibles jurisdicciones. Pero a medida que sus efectos se sondean a temperaturas cada vez mayores, las fuerzas cambian; sus diferencias desaparecen, junto con muchos de los problemas que han dificultado nuestros intentos pasados de entender cada una de estas cuatro fuerzas como una simple característica autónoma del Universo. Casi todos los físicos esperan que, en última instancia, se encontrará que las cuatro formas naturales son manifestaciones diferentes de una «superfuerza» básica, que manifiesta su unidad sólo a temperaturas muy altas. De hecho, tal unificación ya ha sido confirmada experimentalmente para dos fuerzas: la fuerza electromagnética y la fuerza débil. Resulta intrigante saber que la

simplicidad del mundo depende de la temperatura del entorno. A las bajas temperaturas a las que es posible la bioquímica que soporta la vida —a las que pueden existir los átomos— el mundo parece ser complicado y diverso. Esto es inevitable. Las simetrías que ocultan a la vista la unidad subyacente de las fuerzas de la Naturaleza deben estar rotas para que puedan aparecer las estructuras complejas necesarias para la complejidad viviente. La verdadera simplicidad de las leyes de la Naturaleza sólo es evidente en un ambiente tan próximo al infierno del Big Bang que no puede existir ningún «observador» complejo. No es casual que el mundo no parezca simple; si fuera simple, entonces nosotros seríamos demasiado simples para saberlo.

Los trescientos años de éxitos de los que hemos disfrutado utilizando el concepto de leyes de la Naturaleza para dar sentido al Universo han tenido efectos indirectos. La idea de que la marcha del mundo está gobernada por «leyes» impuestas desde fuera, en lugar de por tendencias innatas dentro de los objetos individuales, reflejaba y alentaba una creencia religiosa en una única deidad omnipotente que decretaba dichas leyes de la Naturaleza. La economía de las leyes de la Naturaleza, su comprensibilidad y su universalidad han sido interpretadas, en el pasado, como pruebas convincentes de la existencia de un artífice divino detrás del funcionamiento del Universo visible.

Además de las leyes de la Naturaleza necesitamos alguna receta para el estado del Universo cuando éste empezó o, si no hubo principio, una especificación de cómo debe haber sido en algún instante en el pasado. Por fortuna, muchos aspectos del Universo parecen depender muy poco de cómo empezó. Las altas temperaturas de las etapas tempranas del Big Bang borran la memoria de muchos aspectos del estado inicial. Ésta es una razón por la que es tan difícil reconstruir el Big Bang, pero también nos permite entender muchos (aunque no todos) aspectos de la estructura presente del Universo y su historia reciente sin saber cómo era al principio. Algunos cosmólogos creen que sería mejor que se hubiera perdido toda memoria de

las condiciones iniciales, porque entonces cada aspecto de la estructura actual del Universo podría entenderse sin saber cómo era el estado inicial del Universo. Otros, muy en especial James Hartle y Stephen Hawking, han intentado en años recientes seleccionar un candidato especial para el estado inicial[9].

Por desgracia, la parte del Universo que es visible para nosotros, pese a tener un tamaño de 15 000 millones de años-luz, ha surgido de la expansión de una minúscula parte del estado inicial entero. Aunque algún gran «principio» pueda dictar en realidad la estructura promedio del estado inicial del Universo entero (posiblemente infinito), eso no puede ayudarnos a determinar la estructura de la minúscula parte del total que se expandió para convertirse en la parte del Universo que hoy es visible para nosotros.

Además de las leyes de cambio y la especificación inicial del Universo, necesitamos algo más para distinguir nuestro Universo de otros que podamos imaginar. Las intensidades de las fuerzas de la Naturaleza y las propiedades de los objetos elementales gobernados por dichas leyes, que crean el tejido del Universo, están prescritas por una lista de números que llamamos «constantes de la Naturaleza». Éstas catalogan aquellos aspectos del Universo que son absolutamente idénticos en todo tiempo y lugar[10]. Incluyen las intensidades intrínsecas de las fuerzas de la Naturaleza, las masas de las partículas elementales de materia, como electrones y quarks, la carga eléctrica portada por un electrón individual y el valor de la velocidad de la luz. Actualmente sólo podemos determinar estas cantidades midiéndolas con precisión cada vez mayor. Pero todos los físicos creen que muchas de estas constantes, si no todas, deberían estar determinadas por la lógica intrínseca de una teoría final de las fuerzas naturales. Y, de hecho, la predicción correcta de dichas constantes podría ser el test definitivo de cualquier teoría.

---

[9] Esto se describe en el libro de Hawking *Una breve historia del tiempo*, y en mi libro *Teorías del todo.*

[10] Véase mi libro *Las constantes de la naturaleza* para una exposición de mayor alcance.

Nuestro cuarteto de fuerzas que aseguran la estructura de la Naturaleza se completa con información sobre la manera en que se desprenden los productos de las leyes de la Naturaleza. Una sutileza profunda del mundo es la forma en que un Universo gobernado por un pequeño número de leyes simples puede dar lugar a la plétora de estados y estructuras complicados que vemos a nuestro alrededor, y de la cual nosotros mismos somos ejemplos dignos de destacar. Las leyes de la Naturaleza se basan en la existencia de una pauta que liga un estado de cosas con otro, y donde hay pauta hay simetría. No obstante, a pesar del énfasis que hacemos en ellas, no somos testigos de las leyes de la Naturaleza. Sólo vemos los *productos* de dichas leyes. Más aún, las simetrías que las leyes consagran están rotas en estos productos. Supongamos que ponemos en equilibrio una aguja sobre su punta y luego la soltamos. La ley de la gravedad, que gobierna su movimiento posterior, es perfectamente democrática. No tiene preferencia por ninguna dirección particular en el Universo: es simétrica a este respecto. Pero cuando la aguja cae, debe caer en una dirección particular. La simetría direccional de la ley subyacente está rota en cualquier resultado particular gobernado por ella. Por la misma razón, la aguja caída oculta la simetría de la ley que la determinó. Tal «ruptura de simetría» gobierna mucho de lo que vemos en el Universo, y sus orígenes pueden ser verdaderamente aleatorios. Permite que un Universo gobernado por un pequeño número de leyes simétricas exhiba una infinita diversidad de estados asimétricos y complejos. Así es como el Universo puede ser simple y complicado a la vez. Para el físico de partículas que busca las leyes últimas de la Naturaleza, todo está gobernado por la simplicidad y la simetría, pero para quienes tratan de dar sentido a la caótica diversidad de los productos asimétricos de las leyes simétricas de la Naturaleza, simetría y simplicidad raramente son sus manifestaciones más admirables. El biólogo, el economista o el sociólogo se centran en las complejidades que se encuentran en los complicados productos de las leyes de la Naturaleza. Estos productos no están

gobernados por la simplicidad ni por la simetría. Hace cientos de años, los teólogos naturales trataban de impresionar a sus lectores con historias de la maravillosa simetría y las simplicidades de la Naturaleza; ahora vemos que, irónicamente, es la desviación respecto a dichas simplicidades la que hace posible la vida. Es de los defectos de la Naturaleza, y no de las leyes de la Naturaleza, de lo que depende la posibilidad de nuestra existencia.

Es útil dividir nuestros cuatro factores (leyes, condiciones iniciales, constantes y rupturas de simetría) en dos pares. Las leyes y las constantes de la Naturaleza son características que respetan la uniformidad y la simplicidad, mientras que las condiciones iniciales y las rupturas de simetría permiten la complejidad y la diversidad. Estos cuatro factores determinan la naturaleza del entorno cósmico. Sólo si su combinación cae dentro de un intervalo bastante estrecho será posible que se desarrolle cualquier forma de complejidad en el Universo. Este intervalo delimita los universos dentro de los que es posible la vida. Muestra las condiciones que son necesarias para que evolucione la vida. Ninguna de ellas es suficiente para garantizar que la vida evolucione, y mucho menos para que continúe sobreviviendo. Conforme descubrimos los modos en que el entorno cósmico satisface las condiciones necesarias para que evolucione y persista la vida, encontramos que tienen subproductos inusuales. Aseguran que muchas de nuestras actitudes hacia el Universo y sus contenidos, junto con algunas de nuestras propias creaciones y fascinaciones, son consecuencias sutiles de la estructura del Universo.

Al principio, parece muy poco probable que el Universo, en conjunto, pudiera haber tenido mucha influencia sobre las cosas aquí y ahora. Estamos acostumbrados a que las influencias locales sean las más fuertes. Pero los vínculos pueden ser sutiles. ¿Quién hubiera pensado que el enorme tamaño del Universo tendría un papel que desempeñar en nuestra propia existencia? De hecho, durante cientos de años los filósofos han utilizado la enormidad del Universo como un argumento contra la trascendencia de la vida en la Tierra. Pero las cosas no son exactamente lo que parecen. La vida es en el

fondo una manifestación de un alto nivel de complejidad organizada en los niveles atómico y molecular. Cualquier forma estable de complejidad debe estar basada en combinaciones de elementos químicos que son más pesados que el hidrógeno y el helio. La forma química de la vida que parece haber evolucionado espontáneamente en la Tierra está basada en los elementos carbono, oxígeno, nitrógeno y fósforo, que pueden realizar todo tipo de gimnasias moleculares en combinación con el hidrógeno. Pero ¿de dónde proceden los elementos como el carbono? No salen del Big Bang: éste se enfrió demasiado deprisa. En su lugar, son producidos en una lenta cadena de reacciones nucleares en las estrellas. Primero, el hidrógeno se transforma en helio; luego, el helio en berilio, y luego el berilio se quema para dar carbono y oxígeno. Cuando las estrellas explotan como supernovas dispersan estos elementos biológicos por el espacio. Finalmente, encuentran su camino hacia los planetas, las plantas y las personas. La clave de estos procesos de alquimia estelar es el tiempo que necesitan. La cocina nuclear es lenta. Se necesitan miles de millones de años para producir elementos como el carbono que proporcionan los ladrillos para la complejidad y la vida. Por ello, un universo que contenga seres vivos debe ser un universo viejo. Pero, puesto que el Universo se está expandiendo, un universo viejo debe ser también un universo grande. La edad del Universo está inextricablemente ligada a su tamaño. El Universo debe tener un tamaño de miles de millones de años-luz, porque se necesitan miles de millones de años de alquimia estelar para crear los ladrillos de la complejidad viviente. Incluso si el Universo fuera tan grande como la Vía Láctea, con sus cien mil millones de sistemas estelares, sería totalmente inadecuado como un ambiente para la evolución de la vida, porque tendría poco más de un mes de edad.

El gran tamaño del Universo puede ser inevitable si tiene que contener vida. Pero el enorme tamaño y la baja densidad del Universo en que se encuentran los seres vivos tienen consecuencias para su visión del mundo y de sí mismos. El distanciamiento de los cuerpos celestes lejanos ha tentado a

algunos a considerarlos divinos; para otros, una conciencia creciente de la inmensidad del espacio ha inducido sentimientos de pesimismo y de insignificancia final. Nuestras actitudes filosóficas y religiosas, nuestras ficciones y fantasías especulativas se han desarrollado a la luz de la vida extraterrestre como una mera posibilidad lejana. Los extraterrestres son raros. Una de las razones es el puro tamaño del Universo y la escasez de material en su interior. Si tomáramos toda la materia a la vista en el Universo —todos los planetas, estrellas y galaxias— y la distribuyéramos por igual en un mar de átomos uniforme, terminaríamos con no más de un átomo por cada metro cúbico de espacio. Ésta es una aproximación mucho mejor a un perfecto vacío que la que podríamos crear nunca en uno de nuestros laboratorios. El espacio exterior es, en realidad, básicamente eso: espacio. Por supuesto, la densidad local de materia en el sistema solar es inmensamente mayor que este valor medio, porque está empaquetada en densos grumos como son los planetas, meteoritos y montañas. Si se piensa en reunir esta materia en agregados, podemos ver cuán ampliamente separados tienen que estar estrellas y planetas, y con ellos cualquier civilización que pudieran soportar. Una densidad media de diez átomos por metro cúbico es lo mismo que colocar un solo ser humano (o, digamos, 100 kilogramos de masa) en cada región esférica de espacio de un millón de kilómetros de diámetro. Es también lo mismo que colocar un solo planeta del tamaño de la Tierra en cada región con un diámetro de mil billones de kilómetros, y un sistema solar en cada región que es todavía diez veces más grande.

Crónica de una muerte anunciada. De muerte e inmortalidad

Mientras hay muerte, hay esperanza.

POLÍTICO ANÓNIMO en busca de un cargo más alto.

El ritmo al que se expande el Universo, y con ello su tamaño y su edad, está dictado por la densidad global de materia en su interior, porque la densidad de materia determina la intensidad de la gravedad que decelera la expansión del Universo. Un Universo suficientemente viejo para contener vida debe ser muy grande y contener una densidad de materia promedio muy baja. Esta conexión entre el tamaño, la edad y la densidad del Universo garantiza que las posibles civilizaciones del Universo estén probablemente separadas unas de otras por enorme distancia. Cualquier fenómeno natural muy complicado que se base en una secuencia de procesos improbables será raro en el Universo, y su rareza reflejará la escasez de la propia materia. Esto es frustrante para quienes estén dispuestos a comunicar con extraterrestres, pero para el resto de nosotros puede ser una bendición disfrazada. Asegura que las civilizaciones evolucionarán independientemente unas de otras hasta que estén tecnológicamente avanzadas —o, al menos, hasta que tengan la capacidad de enviar señales de radio a través del espacio—. Significa también que su contacto está (casi con certeza) restringido a enviar señales electromagnéticas a la velocidad de la luz. No podrán visitar, atacar, invadir o colonizarse unas a otras, debido a las enormes distancias que hay que atravesar. Las visitas directas estarían limitadas a minúsculas sondas espaciales robóticas que podrían reproducirse utilizando las materias primas disponibles en el espacio. Además, estas distancias astronómicas aseguran que incluso las señales de radio necesitarán muchísimo tiempo para transmitirse entre civilizaciones en sistemas estelares vecinos. No será posible ninguna conversación en tiempo real. Las respuestas a las preguntas planteadas por una generación serán recibidas en el mejor de los casos por generaciones futuras. La conversación será medida, cuidadosa y ponderada. El aislamiento cultural que ofrecen las enormes distancias interestelares e intergalácticas protege a las civilizaciones de las maquinaciones, o el imperialismo cultural, de extraterrestres que sean enormemente superiores. Impide la guerra interplanetaria y anima el arte de la pura especulación. Si

se pudiera dar saltos en el proceso de avance cultural y científico consultando un oráculo que ofrezca conocimiento que nos llevaría miles de años descubrir sin su ayuda, entonces los peligros de manipular cosas que no se entienden por completo superarían a los beneficios. Toda motivación para el descubrimiento y el progreso humano podría quedar eliminada. Los descubrimientos fundamentales estarían para siempre fuera del alcance. Podría resultar una humanidad decadente y empobrecida.

Si miramos atrás a través de la historia de la cultura occidental podemos rastrear un debate continuo sobre la probabilidad de vida en otros mundos. Nuestra incapacidad para dirimir la cuestión, en un sentido u otro, alimentó el debate especulativo sobre las consecuencias teológicas y metafísicas de la vida extraterrestre. Para san Agustín (354-430), la unicidad supuesta de la reencarnación de Cristo significaba que no podía existir vida extraterrestre, porque también hubiera existido la necesidad de reencarnación en esos mundos. Siglos más tarde, un deísta anticristiano, Thomas Paine (1737-1809), volvió este argumento del revés: él encontraba que la existencia de extraterrestres era evidente, porque no había nada especial en nosotros. Puesto que este estado de cosas era incompatible con la unicidad de la reencarnación, él concluyó que la Cristiandad estaba equivocada. Más recientemente, una trilogía de ciencia-ficción de C. S. Lewis[11] exploraba seriamente una tercera posibilidad: que los seres extraterrestres fueran perfectos y por ello no necesitasen redención ni una reencarnación adicional. La Tierra era una especie de paria moral en el Universo.

La virtud de estas instantáneas es simplemente la de ilustrar cómo el enorme tamaño del Universo, y las enormes distancias que necesariamente existen entre civilizaciones, ha estimulado preguntas teológicas y actitudes metafísicas concretas. Aunque las ramificaciones teológicas de la vida extraterrestre son generalmente ignoradas por los teólogos que piensan

[11] Más allá del planeta silencioso, Perelandra *y* Esa horrible fortaleza.

seriamente sobre la ciencia moderna, sigue habiendo sombras del antiguo debate sobre los aspectos teológicos de otros mundos que ponen la cuestión bajo una nueva luz. Muchos de los entusiastas que buscan señales procedentes de otros mundos han argumentado que las señales de civilizaciones más avanzadas serían de enorme beneficio para la humanidad. Frank Drake, el líder de un proyecto SETI (Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre) a largo plazo, ha sugerido que el contacto con extraterrestres avanzados ayudaría a la humanidad a afrontar sabiamente los «peligros del período que ahora estamos atravesando». Carl Sagan previo la atractiva posibilidad de recibir un mensaje que «podría ser una receta detallada para evitar el desastre tecnológico». Puesto que es más probable que tengamos noticia de las sociedades de más larga vida, éstas son las que con más probabilidad habrán atravesado crisis como la proliferación de armas de destrucción, evitado la contaminación ambiental letal derivada de la expansión tecnológica, resistido catástrofes astronómicas y superado enfermedades genéticas debilitadoras o malestar social. Como conclusión lógica, esta línea argumental lleva a especular que es más probable que recibamos señales de civilizaciones de vida ultralarga que han descubierto el secreto de la inmortalidad, porque éstas tenderán a sobrevivir el máximo posible.

Drake afirma que:

> *Hemos estado cometiendo un terrible error en no centrar todas las búsquedas... en la detección de señales de inmortales. Pues son los inmortales los que descubriremos con más probabilidad... Un buen seguro para una civilización inmortal sería hacer otras sociedades inmortales como ella, más que arriesgarse en aventuras militares peligrosas. Así pues, cabría esperar que difundieran activamente los secretos de su inmortalidad entre las civilizaciones jóvenes en desarrollo tecnológico.*

Lo interesante en todas estas citas es que presentan los objetivos de una búsqueda de inteligencia extraterrestre de una manera que las hace sonar como una religión tradicional. Buscan una forma de conocimiento transcendente a partir de seres que conocen las respuestas a todos nuestros problemas, que se han enfrentado a ellos vicariamente y los han superado. Al hacerlo, han alcanzado la inmortalidad. Su objetivo ahora es darnos el secreto de la vida eterna.

Se podría argumentar que la inmortalidad no es probablemente un punto final para la evolución avanzada de los seres vivos. A veces parece que el legado universal de la evolución por selección natural es encarnar comportamientos que, aunque ventajosos para la supervivencia en el área pretecnológica, inevitablemente se muestran fatales más tarde, cuando se han hecho disponibles los medios de destrucción total. O, de forma menos pesimista, quizá la difusión inevitable de la vida agota siempre los recursos disponibles para sostenerla. Éstas son dos razones por las que los «inmortales» (incluso si su existencia fuera compatible con la edad finita de un universo Big Bang[12]), o incluso civilizaciones que tienen millones, más que sólo miles de años, pueden no existir en la práctica —incluso si pueden existir en teoría.

La muerte y las extinciones periódicas desempeñan un papel vital en promover la diversidad de la vida. Ya hemos discutido cómo la súbita extinción de especies permite que se acelere el proceso evolutivo. A este respecto, los inmortales evolucionarían más lentamente que los mortales. La inmortalidad también provoca cosas extrañas. Uno recuerda la memorable historia de Alan Lightman[13] sobre un mundo en el que todos viven para

---

[12] Uno de los problemas con la ahora obsoleta cosmología del estado estacionario de Bondi, Gold y Hoyle, en la que el Universo no tiene principio ni fin, y mantiene siempre las mismas propiedades de densidad, expansión y temperatura, era que el Universo debería estar abarrotado de vida. Este argumento fue presentado por el autor y F. J. Tipler e el capítulo de *The Anthropic Cosmological Principle* (Clarendon Press, Oxford)

[13] Véase *Sueños de Einstein* (Tusquets, Barcelona, 1993).

siempre. Su sociedad se dividía en dos grupos completamente diferentes. Estaban los que dejan las cosas para más tarde, carentes de toda urgencia; con una eternidad por delante, había mundo y tiempo suficiente para todo —su lema, sospecha uno, era una palabra como *mañana*[14], pero sin ningún sentido de urgencia—. Por el contrario, había otros que reaccionaban al tiempo ilimitado haciéndose maniáticamente activos porque veían el potencial para hacer cualquier cosa. Pero ellos no habían contado con la rémora que frenaba todo progreso, detenía la terminación de cualquier gran proyecto y paralizaba la sociedad. Esa era la voz de la experiencia. Cuando el padre de cualquier artesano, y el padre de su padre y todos sus ancestros antes que él, siguen estando vivos, la experiencia deja de ser solamente beneficiosa. No hay final para la jerarquía de consultas, para la riqueza de experiencias y para la diversidad de alternativas. La tierra de los inmortales podría estar repleta de proyectos inacabados, dividida en zánganos y trabajadores con filosofías de la vida diametralmente opuestas. Con tiempo de sobra, el tiempo quizá no les habría sobrado.

La muerte puede ser algo útil dentro del proceso evolutivo, al menos hasta el momento en que sus efectos positivos para la especie en conjunto puedan garantizarse por otros medios. Por supuesto, el hecho de que la muerte humana ocurra en una escala de tiempo que es corta tiene un impacto importante sobre el pensamiento metafísico humano y, como consecuencia, domina los fines y contenidos de la mayoría de las religiones. A medida que nos hemos hecho más sofisticados en nuestra capacidad para sanar y prevenir la enfermedad, el ritmo de muertes ha disminuido, y el tiempo de vida humana promedio ha crecido de forma significativa en los países más ricos del mundo. Con este incremento de la esperanza de vida ha llegado un mayor temor a la muerte, y una experiencia reducida de ella entre amigos íntimos y miembros de la familia. Hay mucha especulación sobre el posible

[14] En castellano en el original. *(N. del t).*

descubrimiento de una droga o terapia mágica que aislara algún gen individual que produjera la muerte humana por causas naturales. Modificándolo, habría esperanzas de que estuviéramos en posición de prolongar el tiempo medio de vida humana. Sin embargo, es muy poco probable que el proceso evolutivo hubiera dado lugar a organismos que tengan un único eslabón débil que domine en la determinación del tiempo medio de vida. Es mucho más probable que la asignación óptima de recursos dé como resultado que muchas de nuestras funciones naturales se deterioren aproximadamente al mismo tiempo, de modo que, en promedio, no hay un único factor genético cuyo resultado sea la muerte. Más bien, muchas disfunciones diferentes ocurren aproximadamente en el mismo tiempo de vida. ¿Por qué asignar recursos para desarrollar órganos que trabajaran perfectamente durante quinientos años si otros órganos vitales no duran ni siquiera cien años? Tal reparto de recursos saldría perdiendo frente a una estrategia que repartiera los recursos de modo más uniforme entre los diversos órganos críticos, de modo que éstos tuvieran esperanzas de vida similares. Hay una historia sobre el finado Henry Ford que ilustra la aplicación de esta estrategia en la industria del automóvil. Ford envió a un equipo de agentes a viajar por regiones de Norteamérica en busca de automóviles Ford Modelo T fuera de uso. Les encargó que descubrieran qué componentes no habían fallado nunca. Cuando regresaron informaron de fallos de casi todo, excepto de los ejes de la dirección. Siempre les quedaban años de servicio cuando alguna otra pieza fallaba de modo irrecuperable. Sus agentes esperaban oír que el patrón mejoraría la calidad de todos esos componentes que fallaban. Poco después, Henry Ford anunció que en el futuro los ejes del modelo T se fabricarían con unas especificaciones menos exigentes.

Podría parecer razonable que nuestros cuerpos desarrollaran la capacidad de reparar todos los daños y defectos de los órganos esenciales, igual que sanan los cortes y heridas triviales. Pero éste no sería un uso económico de

recursos cuando se compara con la inversión que se requeriría para generar nueva descendencia. Cuando los animales envejecen y superan el período en el que pueden reproducirse, no se invierten recursos genéticos en repararlos. Una estrategia que beneficia a un organismo joven, pero penaliza a uno viejo, será superior a una con el mismo beneficio medio distribuido por igual, independientemente de la edad del beneficiario. Además, cualesquiera de los genes que favorecen a los organismos jóvenes por encima de los viejos tenderán a acumularse en la población en escalas de tiempo largas. Así pues, una decadencia general de nuestras funciones corporales y nuestra capacidad de autorreparación y regeneración no es sorprendente.

Por supuesto, si llegásemos a recibir cualquier señal extraterrestre, eso tendría enorme transcendencia filosófica tanto como científica. Curiosamente, la primera podría superar con mucho a la segunda. Por ejemplo, supongamos que recibiéramos una descripción de un simple fragmento de física o de química. Esto no podría decimos nada sobre estas disciplinas que ya no conociéramos, pero si utilizara estructuras matemáticas similares a la nuestra, si mostrara ideas similares sobre la estructura del Universo físico —conceptos análogos, como constantes o leyes de la Naturaleza— entonces su impacto sobre nuestros filósofos sería inmenso. Tendríamos evidencia directa de la existencia de una única y legítima estructura en el corazón de la Naturaleza que existía independientemente de la naturaleza e historia evolutiva de sus observadores. En el dominio de las matemáticas podrían emerger similares revelaciones profundas. Si los mensajes revelaran un uso familiar de las matemáticas, con énfasis en la demostración y la manipulación de cantidades infinitas antes que en matemáticas experimentales con computadores en búsqueda de relaciones habituales, entonces necesitaríamos reafirmar nuestras actitudes respecto a la idea de que las matemáticas existen y se descubren, en lugar de ser meramente inventadas o generadas por la mente humana. Esperaríamos que los extraterrestres tengan lógica, pero ¿sería nuestra lógica? ¿Tendrían

actividades artísticas como la música o la pintura? Puesto que éstas son actividades que explotan los limitados rangos de nuestros sentidos humanos, no esperaríamos encontrarlas en la misma forma, pero, como veremos en capítulos posteriores, esperaríamos encontrar tendencias artísticas particulares. Las actividades artísticas que brotan de desarrollos no adaptativos podrían tener casi cualquier forma. Las que son modificaciones o subproductos de comportamientos adaptativos podrían ser algo más predecibles. El simple hecho de tener pruebas de una capacidad para comunicar información en formas específicas sería muy revelador. La apreciación artística podría convertirse incluso en una fascinante actividad predictiva (¿científica?) que intentara predecir, sobre la base de una evidencia primaria, básicamente técnica o científica, la naturaleza de las actividades artísticas que pudieran haber surgido de ellas. Con respecto al lenguaje, podríamos encontrar que la programación genética que parece residir en el corazón de la capacidad lingüística humana es sólo una manera de alcanzar un fin locuaz o podríamos encontrar que nuestros interlocutores extraterrestres mostraban una programación gramatical de un tipo sorprendentemente similar a la nuestra. Descubrimientos de este tipo serían mucho más trascendentes que un fragmento de física o metalurgia no conocido que los físicos terrestres podrían descubrir por sí mismos en el futuro. Las cosas que aprendiéramos sobre la unicidad de nuestros conceptos, lenguajes y otros modos de descripción serían cosas que nunca podríamos aprender sin acceso a una civilización extraterrestre independiente, por mucho que avanzáramos en nuestro estudio.

Volvamos a nuestro descubrimiento de que el Universo no sólo es grande, sino que tiene que ser grande para contener objetos suficientemente complicados para denominarse «observadores». A medida que han transcurrido los siglos los astrónomos han elevado continuamente sus estimaciones del tamaño del Universo. Las respuestas a esta ampliación de perspectiva han sido dobles. Ha habido quienes han buscado consuelo en su

creencia de que, pese a nuestra insignificancia física en el espacio, nuestra posición era de todas formas privilegiada. Éramos el objeto de la Creación, si no en una posición central, sí ciertamente de interés cósmico central. Por el contrario, había quienes se desesperaban por nuestra posición en un esquema de cosas que parecía no preocuparse en absoluto por nuestro pasado, nuestro presente o nuestro futuro. En los primeros años del siglo pasado había quienes veían la inminente muerte térmica del Universo como un telón final, que daría un fin poco glorioso a todo lo que valoramos y buscamos.

Sus frustraciones tienen aún eco en las palabras de aquellos como Steven Weinberg, cuya exposición divulgativa del Universo en expansión le llevó a exclamar que «cuanto más comprensible se hace el Universo, más absurdo parece». Movimientos enteros y «procesos» en teología surgieron en respuesta a la imagen de un Universo que funcionaba como un gran motor Victoriano, sometido a la doctrina de la segunda ley de la termodinámica que sólo predica la inevitabilidad de la marcha de lo malo a lo peor. Los teólogos desarrollaron el concepto de un Dios en evolución que no conoce todo lo que aguarda en el futuro. Incluso hoy, encontramos una clara distinción entre teólogos que consideran que la presencia del tiempo, y el flujo de acontecimientos, tiene una importancia teológica vital, y los que, como muchos cosmólogos modernos, ven el futuro como algo ya establecido y determinado porque la totalidad del espacio y del tiempo deben simplemente *estar* ahí.

El objetivo de discutir estas dos respuestas opuestas al tamaño del Universo, y a nuestra posición accidental dentro de él, no es convencer al lector de la corrección de una u otra de ellas. Más bien, es mostrar que estas nociones filosóficas y teológicas son consecuencias de la naturaleza del Universo en que nos encontramos. Si el Universo fuera significativamente diferente; si, de algún modo, pudiera ser muy pequeño y estar rebosante de otras formas de vida con las que fuera fácil entrar en contacto, entonces nuestra lista de

preguntas filosóficas y teológicas importantes sería muy diferente, y nuestra imagen de nosotros mismos tendría poco en común con nuestras ideas actuales. Nos sentiríamos sólo niños en el Universo, y ese sentimiento tiene muchas consecuencias.

Estas consideraciones nos alertan de la trampa de creer que todo lo que importa es el desarrollo científico racional, y de juzgar el progreso de los hipotéticos extraterrestres solamente en términos de su progreso técnico. Las consecuencias de la adaptación evolutiva a entornos inusuales pueden ser completamente inesperadas, y la emergencia de conciencia parece producir impredecibles usos duales de habilidades que hubieran evolucionado para encarar desafíos que ya no existen. Más aún, adaptaciones que son muy fructíferas a corto plazo pueden tener consecuencias letales a largo plazo, como hemos descubierto con respecto a la contaminación industrial de la atmósfera y el medio ambiente de la Tierra. Una manera de considerar el pensamiento humano es verlo como una progresión hacia la racionalidad: cualquier otra cosa es como un virus informático en el cerebro. Pero esto es muy difícil de justificar. No hay muchas pruebas de racionalidad en la historia de la vida consciente en la Tierra. Por otra parte, el pensamiento místico, simbólico y «religioso» —todas ellas formas de pensamiento que el racionalista condenaría como «irracionales»— parece caracterizar el pensamiento humano en todo lugar y en todas las épocas. Es como si hubiera alguna ventaja adaptativa en tales modos de pensamiento que ofrecen beneficios que la racionalidad no puede proporcionar. ¿Cómo podría ser esto? Incluso si pudiéramos establecer más allá de toda duda que un conjunto de ideas religiosas era correcto, esto no explicaría el fenómeno, porque las creencias religiosas humanas han estado dirigidas hacia deidades sin cuenta, acompañadas por una multitud de rituales diferentes y creencias relacionadas. La existencia de una religión verdadera no sirve para explicar la profusión de otras creencias religiosas.

Una posibilidad es que la racionalidad genera precaución; la irracionalidad, el fervor emocional y la creencia ciega no lo hacen. En un mundo donde los conflictos hostiles fueran comunes y cuestión de vida o muerte, demasiada racionalidad podría no ser útil. El celota sin miedo que se siente guiado por fuerzas sobrenaturales es un enemigo difícil de superar. Si uno cree que su territorio es la morada de los dioses, lo defenderá con más pasión que si fuera simplemente su casa. La racionalidad es indudablemente ventajosa cuando se tienen montones de información en la que aplicarla. Pero cuando la comprensión de las cosas es fragmentaria, y se requieren interpolaciones considerables para construir una visión de gran alcance, quizá no sea tan efectiva como una osadía desinhibida. ¿Nos hubiéramos embarcado en viajes de descubrimiento sabiendo lo que ahora sabemos de la geografía y las condiciones climáticas en el océano Atlántico? El espíritu de búsqueda del explorador y el autosacrificio del soldado heroico ofrecen claves para la naturaleza de este lado de la psique humana. Lógicamente, no deberían existir, pero quizá las ventajas que ofrecen las creencias irracionales, especulativas y religiosas, por su capacidad para espolearnos a acciones con consecuencias positivas, son suficientemente importantes para explicar nuestra propensión hacia su adopción. Robots extraterrestres que fueran completamente racionales podrían evolucionar muy lentamente.

El factor humano. Luz en la oscuridad

Somos la gente sobre la que nuestros padres nos advirtieron.
ANÓNIMO

Todo nuestro ciclo vital, y el curso de la evolución por selección natural, responde al ciclo diurno del día y la noche. Sería fácil pensar que la existencia de la noche es solamente una consecuencia de la rotación de la Tierra y su posición con respecto al Sol. Pero no es así. Es una consecuencia

de la expansión del Universo. Si el Universo no se estuviera expandiendo, entonces, donde quiera que miráramos en el espacio, nuestra visual terminaría en una estrella. El resultado sería como mirar dentro de un bosque. En un universo que no se expandiera, el cielo entero parecería la superficie de una estrella; estaríamos iluminados por luz estelar perpetua. Lo que nos salva de esa luz eterna es la expansión del Universo. Ella degrada la intensidad de la luz procedente de estrellas y galaxias lejanas y deja oscuro el cielo nocturno. Durante aproximadamente la mitad de cada día, esa oscuridad siluetea la Luna y las estrellas de la bóveda celeste. De estas siluetas han fluido todas las imágenes, especulaciones e impresiones que las estrellas han inspirado en nosotros. Ninguna civilización carece de historias del cielo y de los cuerpos que brillan en el día y la noche.

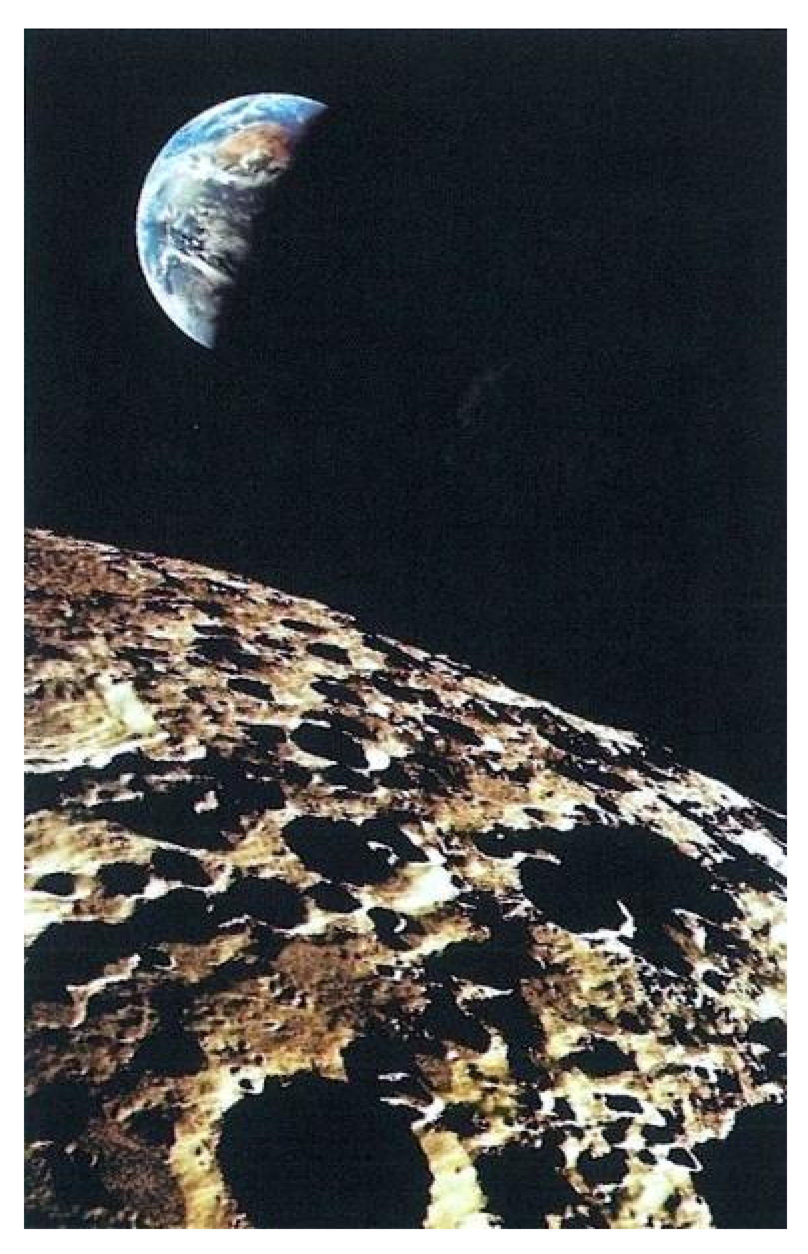


Lámina 7. Salida de la Tierra vista desde la Luna, fotografiada por la tripulación del Apolo 11.

Estas impresiones astronómicas del borde de la oscuridad tampoco están confinadas al pasado lejano o a culturas todavía en su infancia. Recordemos las primeras imágenes de la Tierra desde el *Apolo 11,* en su misión para poner a los primeros hombres en la Luna (Lámina 7): lo sorprendente que era el disco de océano azul, tras los jirones de nubes algodonosas, contra un fondo de total oscuridad, comparado con la Luna árida, gris e inerte.

Estas imágenes hicieron probablemente más que cualquier otra cosa por despertar la conciencia colectiva de la humanidad a lo que podría perderse por contaminación, descuido o locura.

El sentimiento de que el Universo es enorme está profundamente encajado en la psique humana. Las estrellas aparecen cuando el Sol se pone, y con ellas surgen peligros e incertidumbres. Ahora sabemos que las estrellas están demasiado lejos para molestamos, pero todavía pueden inspiramos con su brillo o deprimimos con su infinitud.

El descubrimiento de que nuestro Sol es un actor menor en el reparto de cien mil millones de estrellas que constituyen nuestra galaxia, que esta galaxia no es sino una en una población de al menos cien mil millones dentro de la porción visible del Universo, todo esto nos ha dado motivos para ser modestos cuando apreciamos nuestro lugar en el esquema de las cosas. Es sorprendente que semejante perspectiva sobre nuestra parte en el drama cósmico sólo pudo llegar cuando tuvimos la sofisticación tecnológica para examinar y apreciar la estructura del Universo. Viene como un subproducto de esos mismos avances en capacidad científica que nos tientan con una peligrosa superconfianza en nuestros poderes para controlar, o ignorar, las fuerzas de la Naturaleza. La búsqueda de ciencia pura y aplicada es más que una simple cuestión de equilibrio la investigación de «cielos azules» es más que sólo una prudente inversión en cosas que podrían transformarse inesperadamente en industrias provechosas. Es más que una zanahoria para apaciguar a los científicos o un gancho para atraer a los más jóvenes a las filas de los científicos. Mantener el equilibrio entre conocimiento puro y aplicable sobre la Naturaleza alienta una sana conciencia de la profundidad lógica y el alcance astronómico de la estructura del Universo a medida que se desarrolla la tecnología, pues ello conlleva una humildad sobre nuestra propia situación. Si se busca aisladamente, la tecnología, con sus deslumbrantes beneficios, amenaza con cegarnos. Nuestros pequeños éxitos al manipular la Naturaleza pueden impresionamos demasiado. El hecho de

que una imagen madura de nuestro lugar en el Universo sólo puede emerger cuando se han desarrollado estas habilidades, y las ideas acumuladas que también pueden pervertirla, es algo que hace reflexionar. Muestra por qué el avance de cualquier rama de investigación genera naturalmente nuevas elecciones y plantea problemas éticos. Los problemas que plantea el reconciliar nuestra visión científica siempre cambiante del mundo con otras cosas no son un defecto de la ciencia, o de estas otras cosas, ni son una señal de que hayamos creado una crisis grave. Estos problemas son una consecuencia natural de ampliar nuestros horizontes hasta un grado que nos permite vernos a nosotros mismos en un nuevo contexto, que entonces debe ser utilizado para juzgar las actividades mismas que le dieron lugar. Cualquier civilización que haya desarrollado la tecnología que le permita hablarnos a través de los grandes desiertos del espacio exterior debe haber tropezado con los dilemas que se generan por crear una nueva imagen científica que las incluye a sí mismas. Si han desdeñado o abandonado la búsqueda del conocimiento por sí mismo, y se han convertido en técnicos dedicados meramente a su propia elaboración y supervivencia, quizá carezcan de ese choque de puntos de vista que llamamos conciencia. En nuestro propio planeta, en tiempos recientes, ha habido muchos ejemplos de sociedades cuyo desarrollo técnico galopante se ha llevado por delante la dignidad de los individuos y el valor de la flora y la fauna que nos rodea. Siempre hay una tendencia a que las posibilidades técnicas sean dominadas por lo peor de nuestra naturaleza. Pese a todo, en su mayor parte, los frutos de nuestra pura curiosidad, cuando busca en la estructura interna del mundo, nos toman por sorpresa, nos muestran que las cosas son más profundas y más racionales de lo que sospechábamos, y revelan que estamos más a menudo equivocados que acertados. Tienen la virtud de promover humildad y animarnos a respetar las virtudes de la paciencia, la persistencia y la autocorrección.

El mundo no es suficiente. La gran ilusión

Nada es real.

LOS BEATLES

Últimamente ha habido mucho interés en los multiversos. ¿Qué tipos podría haber? ¿Y cómo podría su existencia ayudarnos a entender aquellas características de nuestro Universo que apoyan la vida, que de lo contrario parecerían ser sólo coincidencias muy fortuitas? En el fondo, estas preguntas no son en definitiva cuestiones de opinión o especulación ociosa. La Teoría de Todo subyacente, si existe, quizá requiera que muchas propiedades de nuestro Universo hayan sido seleccionadas al azar, por ruptura de simetría, de entre una gran colección de posibilidades, y el estado vacío del Universo quizá esté lejos de ser único.

El modelo cosmológico inflacionario preferido que ha sido apoyado de forma tan impresionante por las observaciones de los satélites COBE y WMAP contiene muchas «coincidencias» aparentes que permiten que el Universo soporte complejidad y vida. Si tuviéramos que considerar un «multiverso» de todos los universos posibles, entonces nuestro Universo observado parecería especial en muchos aspectos. La física cuántica moderna proporciona incluso maneras en las que podrían existir realmente estos universos posibles que constituyen el multiverso de todas las posibilidades.

Una vez que se toma en serio que todos los universos posibles pueden existir (o lo hacen), una pendiente resbaladiza se abre ante nosotros. Hace tiempo que se ha reconocido que las civilizaciones técnicas, sólo un poco más avanzadas que la nuestra, tendrán la capacidad de simular universos en los que pueden emerger entidades autoconscientes y comunicarse entre sí. Tendrían una potencia de computación que diferiría de la nuestra en un factor enorme. En lugar de simular meramente su clima o la formación de galaxias, como hacemos nosotros, ellos podrían ir más lejos y observar la aparición de estrellas y sistemas planetarios. Luego, tras haber introducido las reglas de la bioquímica en sus simulaciones astronómicas, podrían

observar la evolución de vida y conciencia (todo ello acelerado para que ocurra en cualquiera que sea la escala de tiempo conveniente para ellos). De la misma forma que nosotros observamos los ciclos vitales de las moscas de la fruta, ellos serían capaces de seguir la evolución de la vida, observar civilizaciones que crecen y se comunican entre sí, discutir sobre si existía un gran programador en el Cielo que creó su universo y que podría intervenir a voluntad desafiando las leyes de la Naturaleza que ellos observaban habitualmente.

Una vez que se ha alcanzado esta capacidad de simular universos, los universos falsos proliferarán y pronto superarán mucho en número a los reales. Así, Nick Bostrom ha argumentado que es más probable que un ser pensante aquí y ahora esté en una realidad simulada antes que en una real.

Motivadas por esta alarmante conclusión, ha habido incluso sugerencias sobre la mejor forma de conducirnos si tenemos una gran probabilidad de ser seres simulados en una realidad simulada. Robin Hanson sugiere que deberíamos actuar de forma que se incrementen las probabilidades de seguir existiendo en la simulación o de ser resimulados en el futuro: «Si uno pudiera estar viviendo en una simulación, entonces todos los demás iguales a uno deberían preocuparse menos de los demás, vivir más el hoy, hacer que parezca más probable enriquecerse en su mundo, esperar y tratar de participar en acontecimientos centrales, ser más divertido y digno de elogio, y mantener a la gente famosa que te rodea más feliz y más interesada en ti». En respuesta, Paul Davies ha argumentado que esta alta probabilidad de vivir en una realidad simulada es una *reductio ad absurdum* para la idea entera de que existen multiversos de todas las posibilidades. Ello socavaría nuestras esperanzas de adquirir cualquier conocimiento seguro sobre el Universo.

El escenario multiverso fue sugerido por algunos cosmólogos como una forma de evitar la conclusión de que el Universo fue diseñado especialmente para la vida por un gran diseñador. Otros lo vieron como una forma de evitar

el tener que decir algo más sobre el problema del ajuste fino. Vemos que una vez que se permite que observadores conscientes intervengan en el Universo, en lugar de ser meramente amontonados en la categoría de «observadores» que no hacen nada, terminamos en un escenario en el que los dioses reaparecen en número ilimitado disfrazados de los simuladores que tienen el poder de vida y muerte sobre las realidades simuladas que crean. Los simuladores determinan las leyes, y pueden cambiar las leyes, que gobiernan sus mundos. Pueden preparar ajustes finos antrópicos. Pueden desconectar la simulación en cualquier momento, intervenir en o distanciarse de su simulación, observar cómo las criaturas simuladas discuten sobre si hay un dios que controla o interviene, hacer milagros o imponer sus principios éticos sobre la realidad simulada. En todo momento pueden desprenderse de cualquier reparo de conciencia por el hecho de molestar a alguien, porque su realidad de juguete no es real. Incluso pueden observar cómo sus realidades simuladas crecen hasta un nivel de sofisticación que les permite simular sus propias realidades de orden superior.

Enfrentados a estas perplejidades, ¿tenemos alguna posibilidad de discernir las realidades falsas de las verdaderas? ¿Qué esperaríamos ver si hiciéramos observaciones científicas dentro de una realidad simulada?

En primer lugar, los simuladores se habrán visto tentados a evitar la complicación de utilizar un conjunto consistente de leyes de la Naturaleza en sus mundos cuando pueden arreglárselas simplemente con efectos «realistas». Cuando la compañía Disney hace una película que representa los reflejos de la luz en la superficie de un lago, no utiliza las leyes de la electrodinámica cuántica y de la óptica para calcular la dispersión de la luz. Eso requeriría una fabulosa cantidad de potencia de computador y de detalle. En su lugar, la simulación de la dispersión de la luz se reemplaza por reglas empíricas plausibles que son mucho más breves que el objeto real pero dan un resultado de apariencia realista —mientras no miremos demasiado de

cerca—. Sería un imperativo económico y práctico que las realidades simuladas se quedaran en eso si se hicieran por puro entretenimiento. Pero tales limitaciones en la complejidad de la programación de la simulación provocarían presumiblemente ocasionales problemas reveladores —y quizá incluso serían visibles desde dentro.

Incluso si los simuladores fueran escrupulosos en simular las leyes de la Naturaleza, habría límites a lo que podrían hacer. Suponiendo que los simuladores, o al menos las primeras generaciones de ellos, tengan un conocimiento muy avanzado de las leyes de la Naturaleza, es probable que aún tuvieran un conocimiento incompleto de dichas leyes (algunos filósofos de la ciencia argumentarían que siempre debe ser así). Podrían saber mucho sobre la física y la programación necesarias para simular un universo, pero habría lagunas o, peor aún, errores en su conocimiento de las leyes de la Naturaleza. Por supuesto, serían sutiles y nada obvios; de lo contrario, nuestra civilización «avanzada» no sería avanzada. Estas lagunas no impiden que se creen las simulaciones y se ejecuten suavemente durante largos períodos de tiempo. Pero, poco a poco, los pequeños defectos empezarían a acumularse.

Con el tiempo, sus efectos crecerían como una bola de nieve y estas realidades dejarían de computar. La única escapatoria es que sus creadores intervengan para parchear los problemas uno a uno conforme aparezcan. Ésta es una solución que será muy familiar para el propietario de cualquier ordenador doméstico que recibe actualizaciones regulares para protegerlo contra nuevas formas de invasión o reparar lagunas que sus creadores originales no habían previsto. Los creadores de una simulación podrían ofrecer este tipo de protección temporal, actualizando las leyes operativas de la Naturaleza para incluir cosas extra que hubieran aprendido desde que se inició la simulación.

En una situación de este tipo, surgirán inevitablemente contradicciones lógicas y las leyes parecerán fallar de vez en cuando dentro de las

simulaciones. Los habitantes de la simulación —especialmente los científicos simulados— estarán intrigados ocasionalmente por los resultados experimentales que obtienen. Por ejemplo, los astrónomos simulados podrían hacer observaciones que muestren que sus denominadas constantes de la Naturaleza están cambiando muy lentamente.

Es probable que pudiera haber incluso cambios repentinos en las leyes que gobiernan estas realidades simuladas. Esto se debe a que con gran probabilidad los simuladores utilizarían una técnica que se ha encontrado efectiva en todas las demás simulaciones de sistemas complejos: el uso de códigos de corrección de errores para volver a poner las cosas en su sitio.

Tomemos, por ejemplo, nuestro código genético. Si se dejara a su aire no duraríamos mucho. Los errores se acumularían y rápidamente seguirían muerte y mutación. Estamos protegidos contra esto por la existencia de un mecanismo de corrección de errores que identifica y corrige errores en la codificación genética. Muchos de nuestros sistemas informáticos complejos poseen el mismo tipo de «corrector gramatical» que previene contra la acumulación de errores.

Si los simuladores utilizaran códigos informáticos de corrección de errores para prevenirse contra la falibilidad de sus simulaciones en conjunto (así como para simularlas en una escala más pequeña en nuestro código genético), entonces de cuando en cuando tendría lugar una corrección en el estado o las leyes que gobiernan la simulación. Ocurrirían misteriosos cambios repentinos que parecerían contravenir las leyes mismas de la Naturaleza que los científicos simulados estaban habituados a observar y predecir.

Cabría esperar también que las realidades simuladas poseyeran un nivel similar de máxima complejidad computacional sobre el tablero. Las criaturas simuladas deberían tener una complejidad similar a las más complejas estructuras no vivientes simuladas —algo para lo que Stephen Wolfram (por

razones muy diferentes, que no tienen nada que ver con realidades simuladas) ha acuñado el término Principio de equivalencia computacional.

Así pues, llegamos a la conclusión de que si vivimos en una realidad simulada deberíamos esperar ocasionales temblores súbitos, pequeños cambios en las supuestas constantes y leyes de la Naturaleza con el tiempo, y una incipiente comprensión de que los defectos de la Naturaleza son tan importantes como las leyes de la Naturaleza para nuestra comprensión de la realidad verdadera.

Capítulo 3
Tamaño, vida y paisaje

Las adaptaciones a características universales de nuestro mundo tienden a escapar a nuestra atención simplemente porque no observamos nada con lo que tales adaptaciones guarden contraste.
ROGER N. SHEPARD

Un balance delicado. Equilibrios en el Universo

La singularidad puede ser el resultado de procesos que son generales para toda la materia viviente.
ROBERT FOLEY

El tamaño importa. Pero ¿cómo importa? ¿Qué determina el tamaño de los seres vivos y de las masas inanimadas de materia celeste en las que viven? Hemos descubierto que las condiciones ambientes en el Universo —la escasez de materia y la inmensa oscuridad tachonada de estrellas del espacio— son consecuencias de la gran edad del Universo. Esta longevidad es esencial para la existencia de los seres vivos: sin ella no habría ni biología ni biólogos. Pese a todo, la vida implica mucho más que saber simplemente lo que se necesita del Universo para que sea habitable. Vamos a seguir una senda que empieza considerando por qué las cosas tienen el tamaño que tienen. Esto nos ayudará a entender por qué los seres vivos se dan en un rango concreto de formas y tamaños. Luego descubriremos que las ramificaciones de tamaño están inesperadamente ligadas a aspectos de nuestra evolución pasada que influyen en nuestro comportamiento actual y en nuestra tendencia a un tipo concreto de gusto estético.

El Universo que nos rodea está lleno de multitud de cosas. Estamos a mitad de camino entre la inmensidad del espacio intergaláctico y el microcosmos subatómico de partículas elementales dentro de los átomos de nuestros cuerpos. Para apreciar la diversidad de la Naturaleza, y para ver dónde estamos situados en el esquema de las cosas, deberíamos empezar haciendo un poco de trabajo de campo. Enviemos un equipo de observadores al Universo para que anoten los tamaños y las masas promedio de todas las cosas que encuentren. Busquemos todo: desde los átomos más pequeños a los más grandes cúmulos de galaxias. Coordinemos toda esta información haciendo una gráfica de los tamaños frente a las masas de las cosas examinadas. El resultado se parecerá a la Figura 3.1.

La imagen tiene una pauta fácilmente discernible. Entre el espacio interno de las partículas subatómicas y la extensión del Universo visible entero hay una variedad más allá de lo imaginable: hay cúmulos de galaxias, galaxias simples de estrellas, cúmulos de estrellas, estrellas brillantes como el Sol, un reparto secundario de planetas y lunas, asteroides y cometas; luego, aún más pequeños, encontramos seres vivos, como árboles y plantas, y un surtido de animales, peces, aves e insectos, antes de llegar al micromundo de bacterias y células; morando dentro de ellas encontramos moléculas grandes y pequeñas, y, finalmente, simples y solitarios átomos de hidrógeno.

Nuestro inventario cósmico promete ser iluminador. Cuando hacemos balance de la figura resultante, una simplicidad oculta invita a una explicación. Uno podría haber esperado que los objetos del mundo estuvieran diseminados por toda la gráfica de una forma completamente aleatoria, mostrando que la Naturaleza explora todas las posibilidades. Nada podría estar más lejos de la verdad. Hay una restricción y un orden oculto para las cosas. Grandes regiones de nuestra gráfica están vacías, y las estructuras de la Naturaleza forman un pasillo estrecho que corre en diagonal desde la parte superior derecha a la inferior izquierda de la gráfica. Hay

evidentemente regiones en las que hay algo y otras donde no hay nada. Tan sólo necesitamos saber por qué.

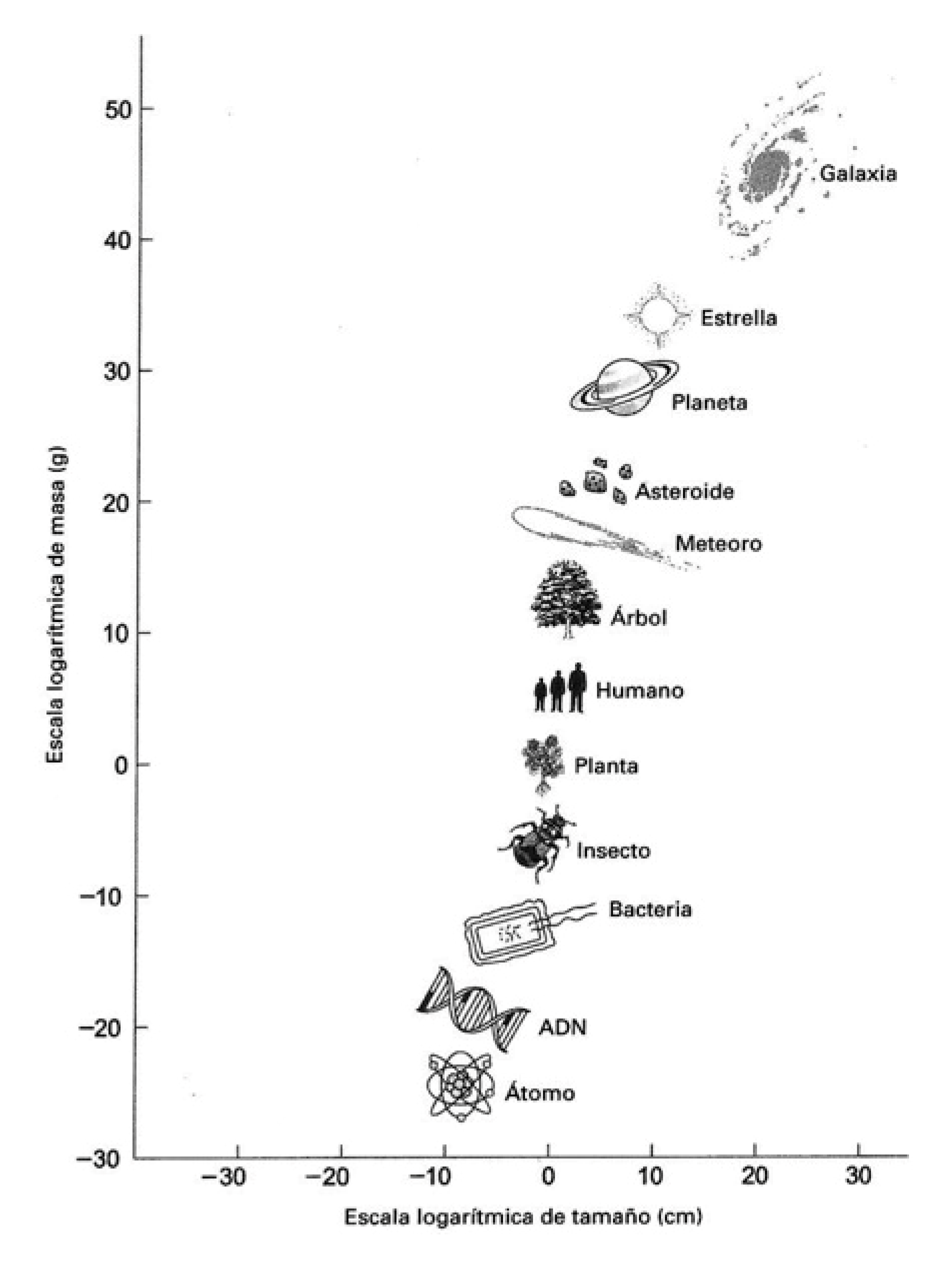


Figura 3.1. Masas y tamaños de algunas de las estructuras más importantes encontradas en el Universo.

En primer lugar, tenemos que apreciar que las cosas que nos rodean *están* en el sentido más amplio. Cualquier estructura que vemos en el Universo es resultado de un balance entre fuerzas opuestas de la Naturaleza. Puesto que

existen en la Naturaleza cuatro fuerzas con intensidades y alcances distintos, hay lugar para una diversidad de equilibrios muy diferentes en los que la materia se mantiene sometida a dos fuerzas opuestas. Tenemos la suerte de que el número de fuerzas naturales sea pequeño: como resultado, la Naturaleza es razonablemente inteligible para nosotros. Si hubiera miles de fuerzas básicas de la Naturaleza, en lugar de sólo cuatro, entonces el número de estructuras diferentes que podrían resultar de dos cualesquiera de ellas en equilibrio aumentaría enormemente, y la búsqueda de pautas simples sería mucho más difícil —quizá más allá de nuestra capacidad de análisis.

No todas las estructuras de nuestro inventario deben su existencia a equilibrios entre dos fuerzas del cuarteto de fuerzas de la Naturaleza; en algunas situaciones el equilibrio se produce cuando una fuerza de la Naturaleza contrarresta el movimiento. Los cúmulos de galaxias y las galaxias espirales muestran los resultados de un equilibrio entre la fuerza centrípeta de la gravedad que tira de unas estrellas hacia las otras, y la rotación de las estrellas que describen órbitas alrededor del centro del cúmulo.

Las estrellas individuales se mantienen en un equilibrio entre el aplastamiento hacia adentro de la gravedad y la presión hacia afuera del hidrógeno, o de la radiación, sostenida por las radiaciones nucleares que ocurren cerca del centro de la estrella. Los cuerpos que son demasiado pequeños para que el aplastamiento gravitatorio en sus centros produzca temperaturas de millones de grados, que son necesarias para iniciar las reacciones nucleares, nunca pueden convertirse en estrellas. En su lugar, quedarán como los cuerpos fríos que llamamos «planetas». Los planetas son actas de balance en las que las fuerzas interatómicas, que resisten cualquier tendencia de los átomos a solaparse, son suficientemente fuertes para resistir el empuje hacia adentro de la gravedad.

Estas simples consideraciones han revelado a los astrónomos por qué los planetas y las estrellas tienen el tamaño que tienen. Por desgracia, todavía no sabemos si las galaxias y los cúmulos de galaxias deben sus tamaños a un principio de balance similar o si son sólo residuos de irregularidades aleatorias que nacieron con el propio Universo. Las galaxias son muy probablemente los mayores agregados de gas que tienen tiempo para enfriarse y fragmentarse en estrellas en el tiempo que necesitan para contraerse de tamaño bajo la influencia de la gravedad. Si es así, los tamaños de las galaxias estarán determinados por las intensidades intrínsecas de las fuerzas electromagnética y gravitatoria de la Naturaleza, como sucede con las estrellas. Pero los cúmulos de galaxias probablemente no tienen una explicación similar. Durante el primer millón de años de la historia del Universo, cuando era demasiado caliente para que existieran átomos y moléculas, o estrellas, un mar cósmico de radiación fue capaz de suavizar cualquier irregularidad en la distribución de materia que fuera suficientemente pequeña para que la atravesaran las ondas de radiación. Los cúmulos de galaxias parecen ser las irregularidades más pequeñas que sobrevivieron a este proceso de suavización. Probablemente hubiéramos predicho la existencia de estrellas y planetas, incluso si nunca hubiéramos visto unos u otros, pero sospecho que no habríamos predicho que el Universo contiene bestias como galaxias y cúmulos de galaxias.

Se da un equilibrio entre fuerzas gravitatorias y atómicas cuando la materia tiene una densidad próxima a la densidad de los átomos individuales. Planetas, montañas, árboles, personas, insectos, células y moléculas están compuestos de conjuntos de átomos estrechamente empaquetados. La densidad de estos conjuntos de átomos es por lo tanto similar a la densidad de tan sólo uno de los átomos de los que están hechos. Si dos objetos tienen la misma densidad, eso quiere decir que la razón de su masa a su volumen es la misma. Puesto que el volumen es proporcional al cubo de una medida lineal media de tamaño, vemos por qué todos estos objetos sólidos yacen a

lo largo de una línea con una pendiente próxima a tres en el diagrama. Ésta es una línea de densidad constante, y esa densidad es la densidad atómica: la densidad de los átomos individuales. Se extiende desde el átomo más simple de hidrógeno (que consiste en un protón y un electrón) hasta las mayores estructuras sólidas en el Universo. Cúmulos de estrellas, galaxias y cúmulos de galaxias son conjuntos de estrellas en órbita, más que objetos sólidos; por ello tienen menor densidad y yacen ligeramente por debajo de la línea de densidad atómica constante. Vemos así por qué las cosas que se muestran en el Universo forman tal conjunto ordenado. Pese a su diversidad superficial, están unidas por un solo hilo —la similitud de sus densidades— que deriva del hecho de que representan estados que pueden soportar la aplastante fuerza de la gravedad.

¿Qué pasa con los espacios vacíos de nuestro diagrama? La región que queda aparte de los objetos de pequeño tamaño y gran masa debe estar completamente vacía. Los astrofísicos han llegado a apreciar poco a poco la razón de esta vaciedad. Es el dominio del «agujero negro». Estamos familiarizados con la necesidad de lanzar proyectiles a gran velocidad para que escapen a la atracción de la gravedad de la Tierra. Si arrojamos una piedra al aire, entonces la gravedad de la Tierra la devuelve al suelo. Lancémosla un poco más deprisa y la piedra llega más alto antes de volver. Pero si lanzamos un cohete suficientemente rápido, entonces puede escapar por completo a la atracción de la Tierra. Cuanto más grande es un planeta, más material contiene, mayor es la atracción de su gravedad y con más rapidez hay que lanzar un objeto para que escape al espacio exterior. Se requiere una velocidad de lanzamiento de unos 11 kilómetros por segundo para que un cohete escape de la gravedad de la Tierra. Conforme aumenta la masa del planeta, o disminuye su radio, la velocidad requerida para escapar del tirón de su campo gravitatorio aumenta. En el siglo XIX, un científico inglés, John Mitchell, y un matemático francés, Pierre Laplace, concibieron la idea de cuerpos celestes que eran suficientemente masivos, y

suficientemente pequeños, para que fuese imposible que escapase la luz. Serían invisibles a los observadores exteriores y sólo podrían ser detectados gracias a la atracción de su gravedad. Estos agujeros negros, como han llegado a conocerse, parecen poblar el Universo con gran profusión. Apenas hay una rama de la astrofísica que no encuentre pruebas de su existencia o necesidad de apelar a sus campos gravitatorios ultrafuertes para explicar un conjunto de sucesos astronómicos cataclísmicos de otro modo inexplicables. Su existencia es la razón de la misteriosa carencia de estructuras masivas y pequeñas en nuestro inventario del Universo: dichos objetos no podrían verse. Cualquier cosa que cayera en esa parte de nuestra gráfica sería invisible, atrapada, incomunicada, dentro de un agujero negro.

Esto nos deja con la tarea de explicar la otra región vacía de nuestra gráfica. Una vez más, hay una limitación fundamental a lo que la Naturaleza nos permite observar, independientemente de la sensibilidad de nuestros instrumentos. Cuando «vemos» algo, registramos un fotón de luz que rebota en ello, directamente hacia la retina de nuestro ojo o indirectamente a través de las lentes focalizadoras de un microscopio. Si el objeto que estamos viendo es grande, entonces el retroceso que experimenta cuando rebota el fotón es totalmente despreciable. Vemos el objeto claramente en una posición definida: los fotones de luz que rebotan de un autobús hacia nuestro ojo cuando cruzamos una carretera no producen ninguna ambigüedad sobre la posición y la velocidad real del autobús. Pero, en el caso de objetos muy pequeños, el efecto del retroceso puede producir una perturbación relativamente grande en lo que estamos tratando de medir. Para «ver» algo necesitamos exponerlo a una luz de longitud de onda similar a su tamaño; por ello, los objetos pequeños requieren pequeñas longitudes de onda de la luz, que tienen altas frecuencias y altas energías de vibración; éstas son más capaces de perturbar el sistema bajo investigación. Esta situación trampa se expresa por el famoso Principio de incertidumbre descubierto por primera vez por Werner Heisenberg. Afirma que no podemos medir simultáneamente

la posición y la velocidad de algo con precisión cada vez mayor, por perfectos que sean nuestros instrumentos. Una medida de la situación de un objeto pequeño da necesariamente como resultado que su posición quede perturbada por la radiación utilizada en el proceso de medida.

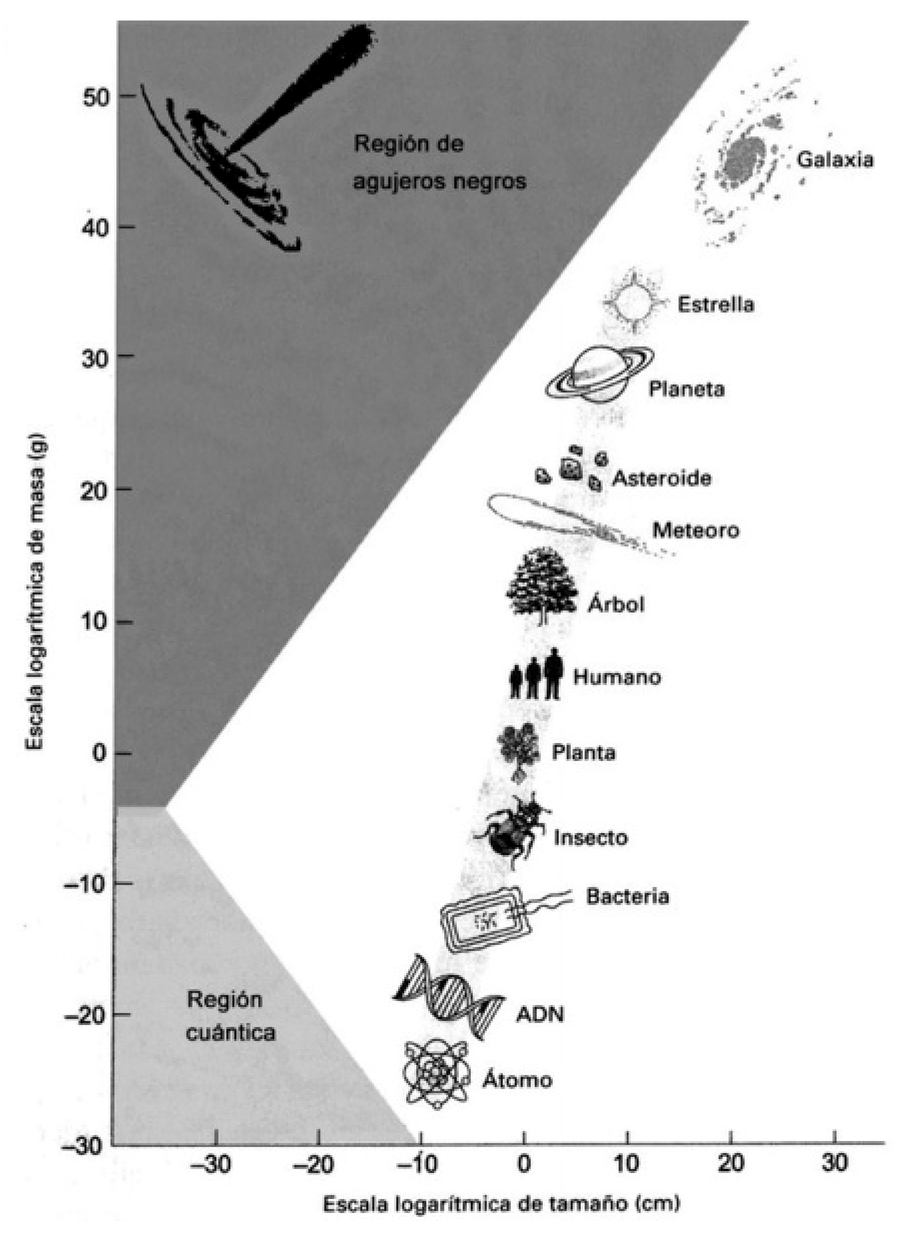


Figura 3.2. Distribución de masas y tamaños donde se ha añadido una línea de densidad constante igual a la de las estructuras atómicas sólidas, una recta que acota la región poblada por agujeros negros, y una recta que acota la región en la que la incertidumbre cuántica hace los objetos inobservables.

Es esta consideración del efecto perturbador en el proceso de medida lo que distingue lo que quiere decir un físico cuando dice que algo es «pequeño» antes que «grande». «Pequeño» suena como un adjetivo totalmente relativo. «¿Más pequeño que qué?» es nuestra respuesta a alguien que nos dice que algo es pequeño. Pero la línea divisoria absoluta entre objetos grandes y objetos pequeños se distingue preguntando si el acto de observarlos con instrumentos perfectos tiene un efecto despreciable o un efecto importante en sus estados.

Hemos trazado el límite de Heisenberg en el diagrama (Figura 3.2). Revela por qué está vacía la última porción de nuestro diagrama. La Naturaleza está construida de forma que no podemos «ver» ningún objeto en el triángulo inferior de la imagen sin perturbarlo por el propio acto de observación. No hay manera de medir objetos que sean discretos y suficientemente suaves para permitimos sondar la región «incierta». Los verdaderos estados en la región cuántica estarían siempre en o por encima de la línea de Heisenberg debido al proceso de medida.

Una lección importante de estas simples consideraciones es que los tamaños de los objetos en el Universo no son aleatorios. Yacen en los rangos que ocupan porque son manifestaciones de balances entre fuerzas opuestas de la Naturaleza. Sus posiciones están determinadas por los valores inflexibles de las constantes de la Naturaleza que expresan las intensidades de dichas fuerzas. Ésta es la explicación para los objetos que vemos. Para los objetos que no vemos, la existencia de agujeros negros y del Principio de incertidumbre de Heisenberg excluye un enorme rango de combinaciones masa-tamaño de la vista de los observadores. El inventario cósmico no es el resultado de un proceso de selección natural ni de un desgaste del conjunto de todas las posibilidades, y no es meramente fortuito: es una cuestión de equilibrio y de censura a la vez.

De ratones y hombres. La vida en la Tierra

«Me gustaría ser un poco más grande, Señor, si a usted no le importa —dijo Alicia—. Medir ocho centímetros es muy triste». «En realidad es una altura excelente», dijo la Oruga.
LEWIS CARROLL,
Alicia en el País de las Maravillas

Acerquémonos un poco más a casa. Cuando cruzamos hacia arriba la línea de densidad constante de la Figura 3.2, la intensidad de la gravedad en la superficie de cada objeto aumenta linealmente con el tamaño y es más difícil escapar de su superficie. Esta simple diferencia entre cuerpos grandes y pequeños tiene consecuencias del mayor alcance. Para entender por qué, sólo necesitamos comparar la Tierra y la Luna.

La Tierra y la Luna son totalmente diferentes. La Tierra está rodeada por una biosfera de extraordinaria complejidad. La Luna es árida y muerta. La razón es que la Tierra tiene una atmósfera de gases, como nitrógeno y oxígeno, que provocan procesos químicos y biológicos complicados en su superficie, mientras que la Luna no tiene ninguno. La Luna es demasiado pequeña para que la atracción de su gravedad retenga una atmósfera gaseosa. Si el aire que hay en su habitación fuera teletransportado a la Luna, las moléculas de gas se estarían moviendo a velocidad suficiente para escapar a la atracción de la Luna y se dispersarían rápidamente por el espacio. Por ello, sólo los planetas con un tamaño superior a uno crítico poseerán atmósferas y ofrecerán la posibilidad de bioquímica. No obstante, el tamaño de los planetas que soportan vida no debe ser demasiado grande. Los seres vivos están formados por conjuntos complicadamente organizados de átomos y moléculas, que se mantienen unidos por enlaces interatómicos y moleculares. Estos enlaces pueden romperse por una presión o una

temperatura excesivas. Cuando se rompen, la materia cambia sus propiedades, a veces de forma irreversible. Fría un huevo y verá lo que le sucede a las moléculas de las proteínas en la clara cuando la temperatura es demasiado alta. De repente, pierden su movilidad fluida y se hacen rígidas a medida que las proteínas de la clara se solidifican. Cuando ocurre este cambio de estado, decimos que el huevo está «cocido». La «cocción» consiste simplemente en alcanzar la temperatura a la que los enlaces intermoleculares se transforman —o se «desnaturalizan» como dicen los químicos. (Otros en mi casa me aseguran que hay más que eso).— Del mismo modo, los delicados enlaces moleculares se romperán si son aplastados, o estirados, por fuerzas intensas. Los seres vivos compuestos de números enormes de átomos y moléculas, que se mantienen unidos por una estructura reticular de enlaces interatómicos, viven por lo tanto más bien peligrosamente. Pongámoslos en un lugar demasiado caliente y sus complejos enlaces moleculares se cocerán hasta la inmovilidad. Pongámoslos en un planeta que sea demasiado grande y serán aplastados por la fuerza abrumadora de la gravedad en su superficie.

Por consiguiente, los planetas habitables no deben ser ni demasiado grandes ni demasiado pequeños. Sólo los mundos intermedios, como la Tierra, combinan la posibilidad de retener una atmósfera con unas condiciones en su superficie que sean suficientemente moderadas para permitir la presencia de arquitecturas moleculares complejas. Incluso en la Tierra, la fuerza de la gravedad desempeña un papel clave para limitar el alcance de seres vivos y objetos inanimados. La necesidad de enlaces entre los átomos para mantener unidas las moléculas es la razón por la que las montañas terrestres no puedan ser mucho más altas que el Everest. Cuando la montaña se hace más alta, y más pesada, la presión en su base aumenta. Si fuera demasiado alta, los enlaces entre los átomos empezarían a romperse y las montañas se hundirían en la corteza de la Tierra hasta que la presión en la base se redujera lo suficiente para que se solidificaran los materiales en la misma.

Los seres vivos —árboles y aves, animales terrestres y criaturas marinas— están también fuertemente limitados en tamaño por las fuerzas de la Naturaleza. Un árbol que creciera demasiado sufriría presiones inaceptables en su base y se rompería. En la práctica, es la susceptibilidad a la ruptura cuando son doblados por el viento la que rompe el árbol y limita su altura máxima. Los árboles no pueden crecer sin límite, porque su fuerza no sigue el ritmo de su tamaño cuando crecen.

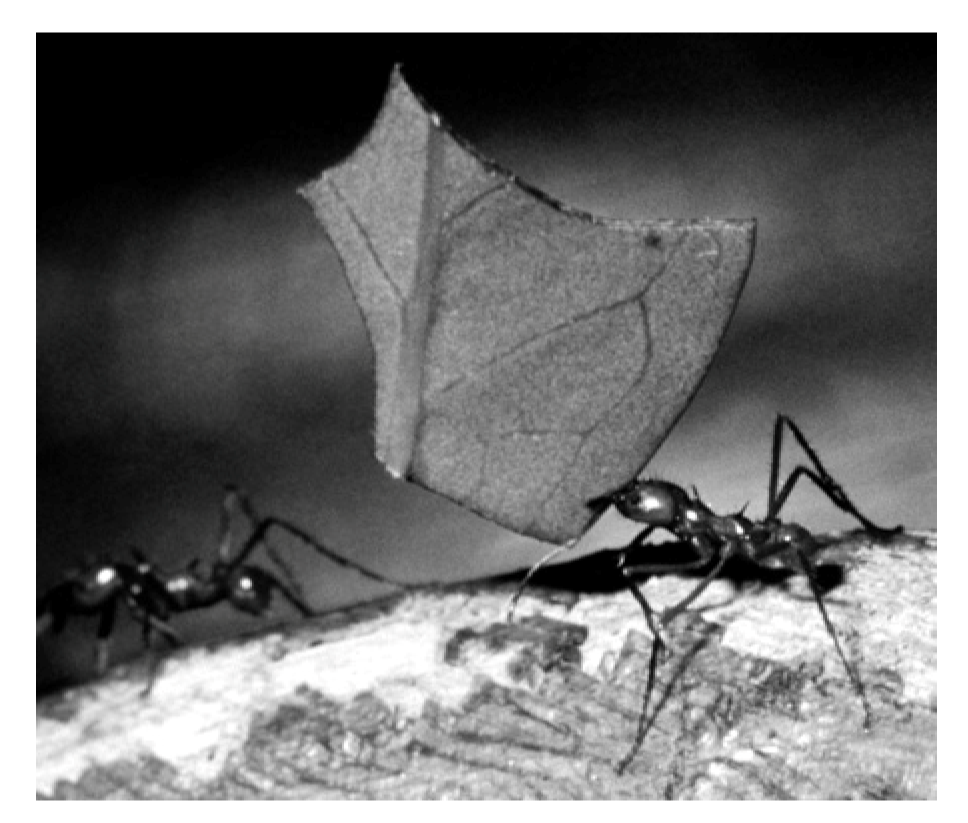


Figura 3.3. Una hormiga es suficientemente fuerte para llevar una carga muchas veces mayor que su propio peso corporal.

Empezamos a ver así como el mundo viviente que nos rodea está conformado por las fuerzas de la Naturaleza a través de una larga cadena de conexiones. Las intensidades relativas de la gravedad y de las fuerzas atómicas de origen electromagnético determinan estrechamente los tamaños de los planetas con atmósferas. El tamaño de las estructuras que pueden

aguantarse de pie, o moverse con seguridad, sobre las superficies de dichos planetas también está limitado por el aplastamiento destructivo de sus enlaces atómicos por la gravedad. Hay límites a los tamaños de los seres vivos porque la resistencia no puede seguir el ritmo del tamaño y el peso a medida que crecen. Este fallo de la resistencia para mantenerse a la par con el peso y volumen crecientes es evidente si observamos criaturas de diferentes tamaños. Una hormiga puede llevar una carga diez veces mayor que su propio cuerpo (Figura 3.3). Un perro pequeño puede llevar fácilmente a otro perro en su espalda. Un niño puede llevar a otro niño a cuestas sin demasiada dificultad, pero un adulto tiene mucha más dificultad, y ningún caballo es suficientemente fuerte para llevar a otro caballo en su espalda. A medida que uno se hace más grande, la resistencia de sus huesos se hace mayor; tienen que ser más largos y más gruesos para soportar la tensión. Un ejemplo gráfico de esta disparidad entre resistencia y tamaño se muestra en un ejemplo doméstico. La cola de un gatito permanecerá levantada como una lanza, porque el gatito es suficientemente fuerte para soportar su pequeña cola. Pero miremos a su madre, más grande. Su cola más larga no se levanta, porque no es suficientemente fuerte para mantenerla erguida. La resistencia de las cosas está determinada no por su peso o por su volumen, sino por el área de un corte transversal. Cuando los huesos se rompen lo hacen a lo largo de una lámina del hueso. Es el número de enlaces que hay que romper en esa lámina lo que determina su resistencia. La masa del cuerpo está determinada por su extensión total; su resistencia a la ruptura está determinada por la estructura de las áreas en las que está sometida a tensión. Visualmente juzgamos la resistencia de un atleta por el tamaño de una sección transversal de sus bíceps[15]. La resistencia de una varilla está determinada por su grosor en el lugar donde tratamos de doblarla, no por su longitud total o su volumen. De todas formas, para la mayoría de los objetos

---

[15] Un examen de los récords mundiales de levantamiento de pesas muestra esta dependencia, siendo el récord de peso levantado proporcional a la potencia dos tercios del peso corporal del levantador.

hay una relación simple entre el área promedio de una sección y su volumen o masa total. Un área es proporcional al cuadrado de alguna medida promedio de la longitud de un objeto, mientras que su volumen (y con ello su masa, si la densidad es constante) es siempre proporcional al cubo de dicha longitud. Si escogemos que la longitud sea un diámetro medio del objeto en cuestión, entonces, a medida que crece en tamaño, su resistencia aumentará como el cuadrado de su tamaño, pero su peso crecerá en proporción a su volumen, y por lo tanto al cubo de su tamaño. Así pues, a medida que se hace más grande, es cada vez menos capaz de soportar su propio peso. Hay un tamaño máximo, después del cual simplemente se rompe.

Uno de los dinosaurios más grandes era el *Apatosaurus* (previamente llamado *Brontosaurus).* Con 85 toneladas, estaba muy cerca del tamaño límite para un animal terrestre. Tenía poco margen de error cuando fuera a inclinarse o a transferir demasiado peso a una pata. (Por comparación, la mayor criatura terrestre actual, el elefante africano, pesa sólo unas 7 toneladas). Subir la más mínima pendiente hubiera sido extraordinariamente gravoso para un gran dinosaurio, porque entonces tendría que elevar una componente de su peso corporal contra la fuerza hacia abajo de la gravedad. Cuanto más pesado es uno, con más lentitud se puede mover cuesta arriba. Los dinosaurios aliviaban las presiones sobre su base repartiendo su carga sobre sus patas muy separadas. Esto ayuda a la estabilidad, pero en cualquier caso, si se cayeran, probablemente se romperían los huesos. Los humanos adultos tienen una distancia mucho más corta para caer si tropiezan, pero a veces se rompen los huesos. Los niños caen desde distancias más cortas y no se suelen romper los huesos a pesar de que están tropezando constantemente. (También ayuda el hecho de que los huesos jóvenes son más blandos y menos frágiles que los viejos). Un adulto puede golpear el suelo con una energía de movimiento más de seis veces mayor que la de un niño cuando ambos tropiezan y caen. Si los adultos fueran el

doble de grandes, entonces caminar erguidos sería un asunto muy peligroso —más bien como caminar sobre zancos.

Una manera de superar el fallo de la resistencia para seguir el ritmo del volumen es explotar la flotación. Cuando cualquier objeto se coloca en un medio líquido, como el agua, experimenta una fuerza de flotación, que le empuja hacia arriba, igual al peso del líquido que desaloja. Como resultado, la tensión en su base se alivia. No es casual que las mayores ballenas azules (con 130 toneladas) sean enormemente más grandes que los más grandes dinosaurios que hayan existido alguna vez o que hubieran podido existir.

El agua también puede soportarle a uno si es pequeño. Coloquemos un clip de papel en la superficie sin perturbar del agua, y flota, soportado por la fuerza de la «tensión superficial» que aparece en la interfaz de su superficie con el agua. Si se añade detergente al agua, entonces esta fuerza se reduce y el clip se hundirá. Criaturas muy pequeñas, como las chinches acuáticas, pueden utilizar la tensión superficial para soportar su peso mientras tienen las patas extendidas sobre unos poco milímetros cuadrados de superficie. De nuevo, la fuerza superficial aumenta más lentamente con el tamaño que el peso de una criatura; hay así un tamaño máximo, y un peso, que pueden ser soportados de esta manera. Sólo funciona si uno es muy pequeño. Los seres humanos necesitarían piernas extendidas sobre 7 kilómetros para caminar sobre el agua, como el escarabajo acuático de Hilaire Belloc:

El escarabajo del agua te enseñará
Un sermón mucho más allá de tu alcance:
Él asombra a la raza humana
Deslizándose sobre la superficie del agua
Con facilidad, celeridad y gracia,
Pero si dejara alguna vez de pensar

En cómo lo hace, se hundiría[16].

Si uno quiere volar, entonces el precio a pagar es ser pequeño. Sus alas deben generar suficiente ascensión para superar la atracción de la gravedad. Cuando se hace mayor, la potencia requerida para soportar el peso crece más rápidamente que la potencia que pueden ejercer los músculos. En consecuencia, hay un tamaño máximo para una criatura voladora. Los pájaros más grandes que pueden cernirse en el aire durante largos períodos son los colibríes; varían entre 2 y 20 gramos de peso. De hecho, pueden incluso despegar verticalmente. Por supuesto, hay pájaros mucho más grandes. En lo más alto están las más grandes avutardas Kori, que pesan unos 12 kilogramos. Pero se mantienen arriba aprovechando los vientos ascendentes o las corrientes térmicas. Análogamente, cuando uno mira un cernícalo que se cierne sobre un punto en el suelo, en realidad no está cerniéndose; está volando contra el viento —con suficiente fuerza para asegurar que permanece en reposo con respecto al suelo—. No es suficientemente fuerte para mantener su propio peso en el aire en reposo.

Estos ejemplos revelan algo de la continua batalla terrestre entre resistencia y peso, que enfrenta la fuerza de gravedad contra las fuerzas intermoleculares de origen electromagnético. Fueron estas mismas fuerzas las que determinaron inicialmente los tamaños inevitables de planetas habitables con atmósferas, la intensidad de la gravedad en sus superficies y, con ello, los tamaños de los seres vivos complejos que pueden existir en sus superficies. Nuestro tamaño no es casual. Está impuesto, dentro de cotas muy estrechas, por las intensidades invariantes de las fuerzas de la Naturaleza. Pero las consecuencias de nuestro tamaño para nuestro desarrollo, nuestra cultura y nuestras capacidades son profundas y amplias.

[16] The water beetle here shall teach / A sermón far beyond your reacha: / He flabbergasts the Human Race/ By gliding on the water's face / With ease, celerity and grace. / But if he ever stopped to think / Of how he did it, he would sink.

Arrojan luz sobre cómo hemos superado a otros seres vivos en el control de los recursos naturales.

La batalla entre resistencia y tamaño se manifiesta en una lucha más sencilla: la que hay entre volumen y la superficie que lo encierra. Observemos una bola de nieve que, mientras cae rodando, recoge más nieve y se hace más grande. Su radio aumenta; por ello, tanto su volumen como su superficie también aumentan. Pero mientras que su volumen crece de acuerdo con el cubo de su radio, su superficie aumenta sólo en proporción al cuadrado del radio: su superficie no puede seguir el ritmo del crecimiento en volumen. Esta batalla perdida que libra el área de la superficie con el volumen cuando aumenta el tamaño impone muchas ligaduras clave sobre los tamaños de los seres vivos. A medida que el volumen aumenta con el crecimiento, también los órganos que generan calor aumentan en volumen y producción de energía. Pero la capacidad para mantenerse frío depende de cuánto calor pueda escapar a través de la superficie expuesta. Las criaturas pequeñas tienen una superficie relativamente grande para su volumen; las criaturas grandes poseen una superficie relativamente pequeña. En climas fríos las criaturas pequeñas tendrán así una desventaja, incapaces de generar calor suficiente a partir de la comida para mantenerse calientes. Por esto es por lo que los niños necesitan estar mucho más abrigados que los adultos en condiciones frías. Los animales grandes, por el contrario, tendrán ventaja en el frío. Por ello encontramos animales grandes —osos polares, antes que ratones pequeños— en los Polos, y el tamaño medio de las aves aumenta entre el Ecuador y los Polos. Las musarañas más pequeñas son tan pequeñas como pueden ser los animales sin estar termodinámicamente en grave peligro en un ambiente que en ocasiones se enfría hasta unos pocos grados por debajo de sus temperaturas corporales. Los animales pequeños pueden combatir este riesgo de exposición apiñándose para retener el calor. Comparten su calor corporal y reducen sus superficies expuestas imitando la geometría de una criatura más grande. Los animales pequeños también

pueden adoptar otras estrategias para reducir sus pérdidas de calor: desarrollando pelo, por ejemplo, o, incluso, como algunas criaturas que conocemos bien, llevando el pelo de otras criaturas que proporciona aislamiento cuando se requiere.

El área superficial también determina con qué rapidez arderán los materiales, porque es en la superficie expuesta donde se consume el oxígeno que sostiene las llamas. Los objetos pequeños tienen relativamente más superficie que los grandes y cuanto más lejos están de una forma esférica, mayor será la superficie que exponen. Por esto es por lo que los copos de lana, de un tamaño de tan sólo una fracción de centímetro, arden mucho más rápidamente que un tronco de diez centímetros de diámetro. Cuando queremos encender una chimenea con trozos de papel, los arrugamos en lugar de extenderlos para aumentar la superficie de papel expuesta.

Nos hemos acostumbrado a descubrir que una estructura que se da de forma natural es la mejor posible de acuerdo con criterios de ingeniería. Pero, como resaltamos en el último capítulo, es erróneo creer que todas las soluciones que da la Naturaleza a los problemas planteados por el entorno son óptimas. Quizá no necesiten serlo. Y el intervalo de variaciones disponible para la selección natural podría no incluir siquiera el caso óptimo, debido a otras limitaciones sobre lo que puede suceder o simplemente debido a la mala suerte. Un ejemplo interesante de este tipo es el panal que construyen las abejas. Esto implica el problema de optimizar el área de la superficie que limita un volumen concreto. Los primeros griegos habían conjeturado que debía existir algún principio de optimización oculto que explicara los panales simétricos de las abejas; en el siglo XVII, el problema fue reconocido como la búsqueda de una pauta que minimizara la cantidad de cera que era necesaria para crear una red de celdas. El panal es una red de celdas de forma prismática, cuyo extremo superior son hexágonos con lados iguales, pero cuyas bases están compuestas cada una de tres planos con forma de diamante (rombos), que están unidos a los lados del hexágono (véase la

Figura 3.4). El zigzag de la superficie inferior del panal hace ciertamente un uso más económico de los recursos que una superficie plana, pero ¿es la mejor forma posible?

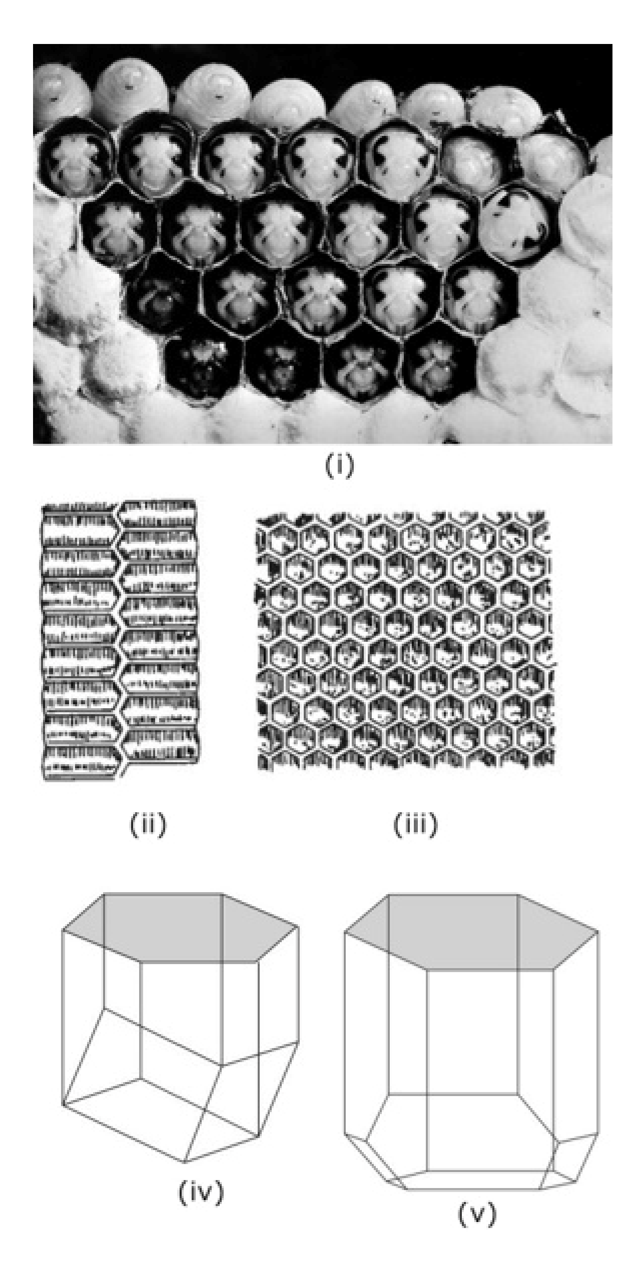


Figura 3.4. (i) Un panal; (ii) una sección longitudinal del panal; (iii) una sección transversal del panal; (iv) una celda individual del panal; (v) la forma de celda descubierta por Fejes Tóth, más económica en materiales que la utilizada por las abejas.

En 1964, el matemático húngaro Fejes Tóth planteó el «problema del panal» como la determinación de la forma de celda que había que utilizar cuando se construye un panal de una anchura dada, que encierra un volumen dado, de modo que las celdas presenten el área más pequeña posible. El problema todavía no está resuelto. Hasta ahora, nadie ha descubierto cuál es la forma de celda más económica, pero se sabe que no puede ser la que utilizan las abejas. Tóth encontró una pauta básica, utilizando dos hexágonos y dos diamantes, que lo hacía mejor que las abejas, pero sólo consigue economizar en superficie menos de un 1 por 100 del área del extremo superior hexagonal de cada celda. Por lo tanto, las abejas podían hacerlo mejor, aunque parece que no mucho mejor.

El borde escarpado. Fractales vivientes

Rodeando las rocas escabrosas corren
los rapaces revoltosos.
RIMA INFANTIL

El estudio de superficies que encierran un volumen concreto de espacio dentro de un área superficial anormalmente grande se ha puesto muy de moda entre matemáticos y *aficionados*[17] al diseño gráfico por ordenador. Tales superficies son ejemplos de lo que el matemático francoamericano Benoit Mandelbrot ha denominado «fractales». Los fractales pueden construirse copiando una forma básica una y otra vez, a una escala cada vez menor. Podemos encontrar espectaculares imágenes fractales a nuestro alrededor, en pósters y portadas de revistas —ha habido incluso exposiciones de «arte» fractal generado por ordenador en importantes galerías internacionales— pero también hay aplicaciones más serias. La complejidad de los diseños fractales ofrece una manera de aumentar la capacidad de las

[17] En castellano en el original. *(N. del t).*

memorias de ordenador y minimizar los efectos de perturbaciones vibratorias en estructuras mecánicas.

Vemos que la Naturaleza utiliza fractales por todas partes: en la ramificación de los árboles y en la forma de las hojas, flores y plantas. Echemos una mirada a una coliflor, o a un brócoli, y podremos ver cómo la misma pauta se repite una y otra vez en diferentes escalas. ¡Qué plan tan económico para el desarrollo de la complejidad! Otra razón para la ubicuidad de los diseños fractales en la Naturaleza es que ofrecen una receta general para escapar a la camisa de fuerza que impone la relación sencilla entre volumen y superficie que encontramos en los objetos regulares, como nuestra bola de nieve rodante. Si se permite que la superficie de la bola se haga complicadamente corrugada, la superficie expuesta puede incrementarse enormemente por encima de la necesaria para encerrar ese volumen de forma suave. Hay abundantes ejemplos de incremento de la superficie fractal (Figura 3.5).

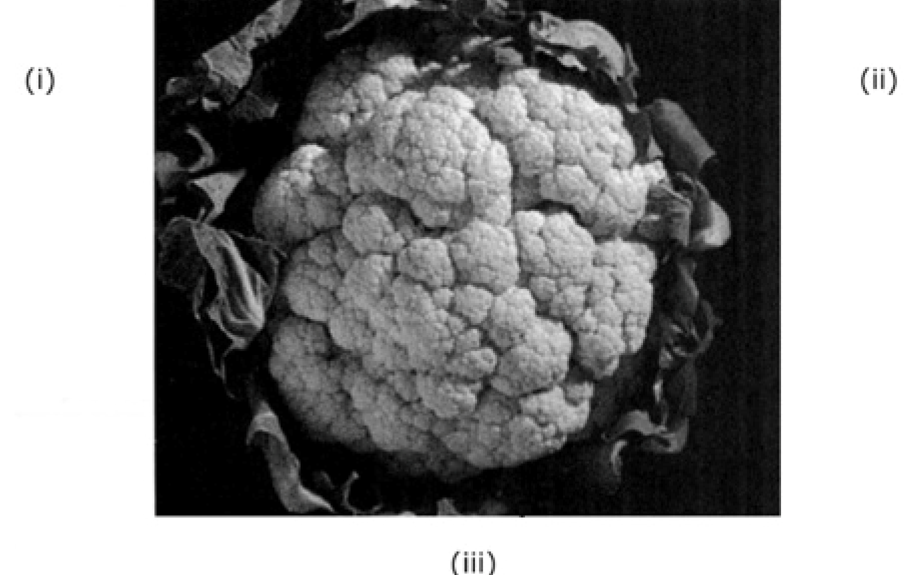


Figura 3.5. Algunos ejemplos de pautas fractales que aparecen en la Naturaleza: (i) el pulmón humano; (ii) un fragmento de plumón; (iii) la cabeza de una coliflor.

Nuestros pulmones muestran una red fractal de tubos ramificantes que maximizan la absorción de oxígeno a través de sus superficies. Las esponjas tienen una superficie mucho mayor que una bola sólida del mismo volumen para aumentar la superficie expuesta a los organismos que ingiere. Cuando salimos de la ducha, nos secamos con una toalla que muestra una superficie de rizos minúsculos. Éstos aumentan el área de la toalla que entra en contacto con el cuerpo, y así aumenta la absorción de la humedad por la toalla.

Donde quiera que se necesita exponer una superficie lo más grande posible, pero hay una restricción sobre el volumen total de material disponible, o se incurre en una penalización por aumento de peso, los fractales son seleccionados por el proceso evolutivo. Las estructuras fractales también son buenas para amortiguar vibraciones. Por ejemplo, si se hiciera un tambor con un borde de forma fractal, entonces un golpe en dicho tambor se amortiguaría rápidamente. Por ello, las formas fractales pueden ser extraordinariamente robustas en situaciones como las de los árboles en el viento, los pulmones jadeantes o los corazones latientes, donde es necesario soportar gran cantidad de vibración asociada.

Cuanto más examinamos la estructura de la Naturaleza, más fractales encontramos. De hecho, su ubicuidad en el mundo natural del que somos parte es una razón por la que los encontramos tan confortablemente atractivos. Son una forma de arte por ordenador que ha captado el programa esencial —reproducción autosimilar de la misma forma en tamaños diferentes— que han utilizado los sistemas vivientes para establecer sus propios nichos distintos a través de la historia evolutiva. Podría argumentarse que las obras de arte fractal generadas por ordenador no llegan a ser formas artísticas que nos parezcan suficientemente interesantes para examinar y *reexaminar* precisamente porque son puramente autosimilares. La imagen sólo se hace artísticamente interesante cuando hay una desviación ocasional de la reproducción autosimilar exacta, en lugar de ser tan sólo simétricamente agradable. A veces es el placer menos exigente de simetría lo que requerimos. No disfrutaríamos de un papel de pared en la sala de estar que hiciese que el cerebro se embarcara en interminables accesos repetidos de análisis e interpretación cada vez que descansáramos nuestra vista en él. Preferimos que las composiciones más desafiantes estén enmarcadas en fronteras que señalen su naturaleza y alerten a la mente del desafío interpretativo que se va a establecer. Al final de este capítulo

tendremos mucho más que decir sobre la cuestión de si el «arte fractal» es realmente arte.

Las tortuosas texturas de las superficies fractales llaman nuestra atención sobre la cuestión de la simetría y la forma. Los seres vivos son llamativamente simétricos. Mientras que los objetos inanimados raramente muestran simetría perfecta, los animales suelen poseer simetría bilateral —al menos externamente—. Éste es un estado de cosas improbable; testimonia una delicada ingeniería y se consigue a un alto coste genético. La simetría está ausente en la dirección vertical porque los cuerpos están adaptados para acomodar la variación de la fuerza de gravedad con la altura, y a la necesidad de permanecer estables frente a pequeñas perturbaciones que de otra forma los harían caer. Un bajo centro de gravedad sobre una base amplia es aquí más ventajoso y conduce a un estrechamiento del cuerpo con la distancia al suelo. Desviaciones de una forma corporal simétrica señalan invariablemente alguna lesión o defecto genético. Algunas de las peores consecuencias de la enfermedad aparecen por la pérdida de nuestra delicada simetría corporal. Muchas de nuestras estimaciones de la belleza física se centran en las simetrías de la forma del rostro y del cuerpo humanos; los cirujanos plásticos reciben grandes sumas por restaurarla o ampliarla. Entre los animales inferiores, la perfección de la forma corporal es un indicador importante para la selección de una pareja y para distinguir a los miembros de la misma especie de los predadores.

El mayor beneficio de un cuerpo bilateralmente simétrico llega cuando uno quiere moverse. En situaciones en las que la supervivencia es reforzada por una capacidad de moverse de una manera predeterminada, los organismos simétricos tienen una ventaja. Los desequilibrios creados por las asimetrías hacen difícil de conseguir el movimiento en línea recta; la simetría asegura que el movimiento lineal aparezca en respuesta a extremidades impulsoras. Los beneficios de la simetría son incluso mayores si dicho movimiento tiene que tener lugar en el agua o en el aire. La evitación de la simetría cabeza-

cola es testimonio del coste más alto que tiene diseñar una configuración que permita movimiento hacia adelante y hacia atrás con la misma facilidad, en lugar de diseñarla con asimetría cabeza-cola y una capacidad de darse la vuelta.

La simetría de los cuerpos de los animales tiene también implicaciones para el cerebro y los sentidos. Las respuestas de un sistema nervioso necesitan un procesamiento más complicado si tienen que crear un mapa corporal mental para monitorizar la actividad en la superficie de una periferia asimétrica. Pero, en cambio, cuando se examina el mapa del propio cerebro, éste es altamente asimétrico. Un lado del cerebro gobierna en general el lado opuesto del cuerpo, y hay una división de actividades cognitivas entre los dos lados del cerebro. Aquí vemos una situación en la que la simetría sería costosa e inapropiada. Si todas las actividades estuvieran controladas por una distribución simétrica de redes neurales, situadas en ambos hemisferios del cerebro, entonces se estaría dando una duplicación de actividad y una malversación de recursos. Tal duplicación no tendría éxito en competencia con sistemas que la evitaran, a menos que hubiera una alta tasa de fracaso de la función cerebral en un hemisferio que hiciera conveniente instalar un sistema de copias de seguridad en el otro. Una situación semejante no evolucionaría. La asimetría de la estructura cerebral refleja la optimalidad ganada por tener unos circuitos próximos a otros. Buena parte del control del cerebro se ejerce sobre secuencias de operaciones que tienen que estar coordinadas meticulosamente, y el esquema asimétrico de la programación del cerebro refleja la necesidad de asociar el control de los movimientos del cuerpo y los sentidos. Puesto que el cerebro gobierna el movimiento, pero no tiene que moverse él mismo, puede estar programado asimétricamente.

Acuerdos bilaterales. Apreciando curvas

Una figura con curvas presenta siempre muchos ángulos interesantes.

MAE WEST

Nuestro gusto por la simetría bilateral parece deber algo a las ventajas evolutivas ofrecidas en otro tiempo a quienes tenían sensibilidad hacia ella. Influye en nuestra valoración de la belleza facial en otras personas y define normas culturales a las que aspiran muchas personas en términos de apariencia corporal. Pero hay también formas artísticas tradicionales que han explotado nuestro gusto por la simetría bilateral en su forma más pura. El mejor ejemplo lo encontramos en la producción de vasijas. La forma de las vasijas es atractiva para el estudio porque es relativamente sencilla. Si consideramos vasijas que tienen una simetría rotacional, como en la tradición china, entonces sólo tenemos que considerar un perfil bidimensional para resaltar lo que hay en la forma que encontramos atractiva. Es lateralmente simétrica, pero puede añadirse un número infinito de variaciones al contorno visual de la vasija que respetan su perfecta simetría izquierda-derecha. Hay una larga tradición de ver rasgos de la forma humana en las formas de las vasijas, como si fueran esculturas. Los términos utilizados para describir las partes de una vasija, la «boca», el «cuello» o el «pie», dan buena fe de ello.

El matemático norteamericano George Birkhoff se interesó durante toda su vida por la estética. Trató de desarrollar maneras sencillas de cuantificar el atractivo estético para captar lo que más nos impresionaba en las obras de arte y ver lo que sucede si creamos obras nuevas que deliberadamente maximicen dichas «medidas estéticas», como él las llamaba. En 1933 escribió un libro de gran interés en donde estudiaba cómo algunos aspectos de la apreciación estética y su búsqueda de «unidad en la diversidad» podían ser captados por sencillas medidas. En general, para una misma clase de creaciones artísticas similares, las medidas de Birkhoff tienen la forma de cociente:

Medida estética = Orden/Complejidad

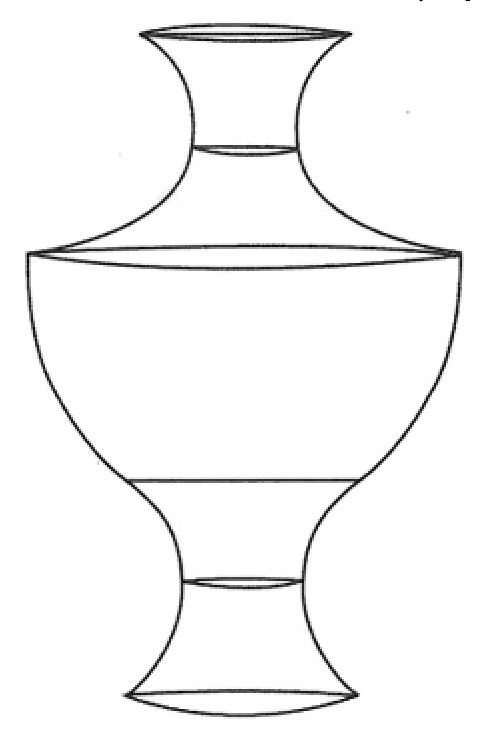


Figura 3.6. Un típico perfil de vasija clásica.

Éste es un intento de cuantificar algunas intuiciones simples. Nos gusta el orden y la simetría, y por ello un aumento en el orden aumenta la medida, pero si también aparece la complejidad, nuestra estima se reduce. Por supuesto, ésta es una aproximación muy simplificada tanto al orden como a la complejidad, pero la pregunta real es cómo se puede definir el orden y la complejidad en esta fórmula.

En el caso de los perfiles de vasijas vistos en proyección nos enfrentamos a evaluar una forma bidimensional como la de la Figura 3.6, si ignoramos el color y la textura. Siempre hay simetría lateral y dos lados curvilíneos con dos extremos circulares o elípticos (por simplicidad, ignoraremos la posibilidad de tapas).

Nuestra apreciación estética del perfil de la vasija está influida por varias características geométricas simples: lugares donde terminan los contornos (la boca y la base de la vasija), lugares donde la tangente al contorno es

vertical, lugares donde la dirección de la tangente cambia abruptamente (las esquinas), y puntos de inflexión en la dirección de la tangente donde cambia la curvatura. Estos puntos especiales en el contorno crean nuestra impresión estética de su forma simétrica (véase la Figura 3.7).

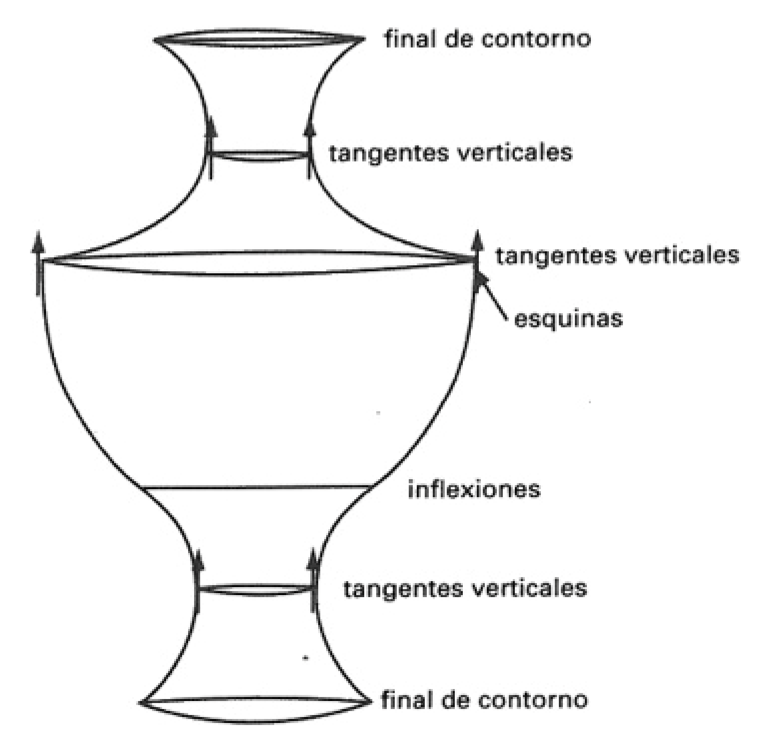


Figura 3.7. Un contorno de vasija en donde se indican los puntos visuales críticos. No todos estos puntos tienen que darse, pero los que lo hacen influyen fuertemente en el impacto estético.

Birkhoff decidió definir la *complejidad,* C, de la forma de la vasija como el número de puntos especiales donde la tangente a su contorno es vertical, tiene inflexiones, esquinas o puntos extremos. Inspeccionando el posible diseño de la Figura 3.7, vemos que la complejidad debe estar entre 6 y 20. Calibrar el *orden,* O, del perfil es algo más complicado. Birkhoff lo definió como la suma de cuatro factores:

a) H: número de relaciones de distancia horizontal que están en una razón de uno a uno o de dos a uno. Este es siempre menor que cuatro.

b) V: número de relaciones de distancia vertical independientes que están en razón de uno a uno o de uno a dos. Éste es siempre menor que cuatro.
c) HV: número de interrelaciones independientes entre distancias verticales y horizontales que están en razón uno a uno o de uno a dos. Éste es siempre menor que dos.
d) T: número de relaciones perpendiculares y paralelas independientes entre tangentes más el número de tangentes verticales en puntos extremos e inflexiones y el número de tangentes características que pasan por un centro adyacente. Éste es siempre menor que cuatro.

Vemos así que el orden debe ser siempre menor que 14. La Medida estética, M, se determina dividiendo el *orden* por la *complejidad,* de modo que M = O/C, y nunca puede ser mayor que 14/6 = 2,333.
De esta manera se analizaron cuatro vasijas clásicas chinas Ming, Sung y Tang: los números resultantes se muestran al lado de sus perfiles en la Figura 3.8. Sus valores M son 0,8; 0,625 y dos de 0,583.

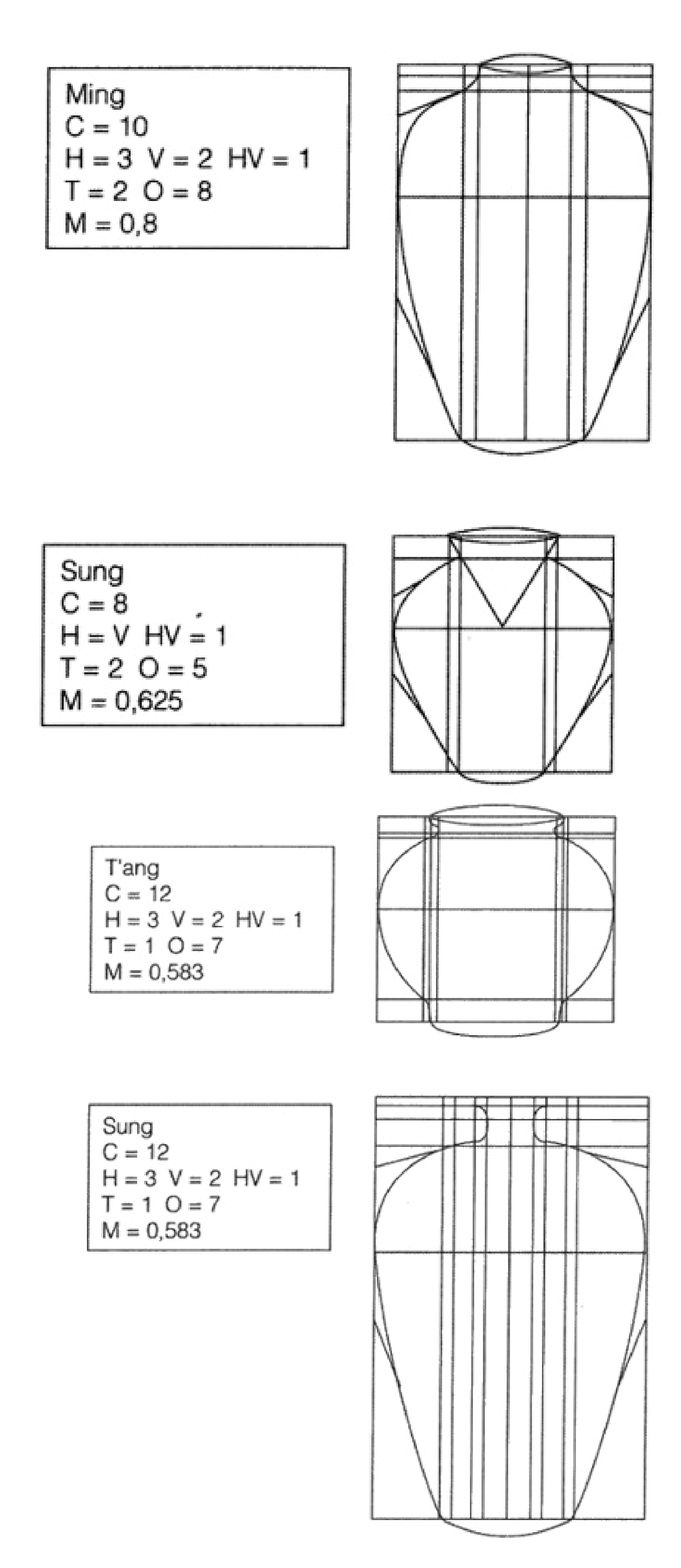


Figura 3.8. El Orden (O), Complejidad (C), y Medida estética (M) de Birkhoff, M = O/C, de cuatro formas de vasija china clásica.

Birkhoff creó luego algunas formas clásicas experimentales de su propia cosecha con vista a maximizar la razón de O/C. Éstas se muestran en la Figura 3.9. Tienen valores M de 1 y 1,08, que son mucho mayores que los de las vasijas reales mostradas en la Figura 3.8.

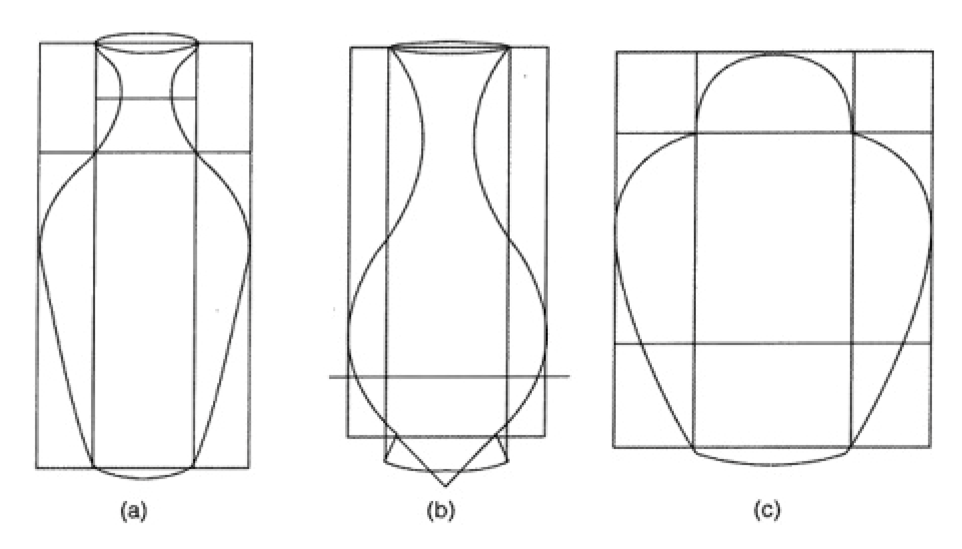


Figura 3.9. Tres formas de vasija generadas artificialmente con altas Medidas estéticas de (a) M = 1.0, (b) M = 1.0, y (c) M = 1.08. Todas éstas superan los valores de Medida estética encontrados para los perfiles de vasijas reales mostrados en la Figura 3.8.

E

Estos ejemplos no pretenden caracterizar unívocamente el atractivo visual de las vasijas; éste estaba lejos de ser el objetivo de Birkhoff e incluso más lejos de ser su conclusión. Más bien, muestra cómo unas consideraciones geométricas específicas pueden captar algunas de las cosas que nos gustan en las curvas y los perfiles. La ponderación real de estos elementos atractivos y visuales en una fórmula es una cuestión totalmente subjetiva.

Birkhoff utilizó esta aproximación para evaluar el atractivo visual de pautas más simples, en las que sólo aparecen líneas rectas, como las que se utilizan en los ornamentos embaldosados. En esta situación las medidas de complejidad y orden son mucho más complicadas y hay muchos más tipos de

formas a crear. Cuanto más restringido está el problema, más significativa es cualquier medida numérica comparativa de impacto estético, aunque ninguna puede reemplazar totalmente al gusto individual.

Expresionismo fractal. El extraño caso de Jack el Goteador

El amor a la complejidad sin reduccionismo produce arte; el amor a la complejidad con reduccionismo produce ciencia.
E. O. WILSON

Hemos visto que los fractales pueblan el mundo natural que nos rodea. Son una solución ubicua al problema de maximizar la cantidad de superficie que posee un cuerpo sin aumentar su volumen y peso al mismo tiempo. Los árboles compiten por luz y humedad, y por ello cuanto mayor es la superficie de las hojas que tienen en contacto con el aire mejor les irá. La receta fractal para crear abundante superficie es copiar el plano una y otra vez con un tamaño cada vez más pequeño (o más grande). La ramificación de un árbol sigue esta receta cuando lo seguimos del tronco a la sucesión de las ramas y a las puntas de las ramitas más pequeñas. Cuando el ángulo de ramificación es pequeño terminamos con un árbol alto y estrecho como un abeto o un álamo, pero cuando el ángulo de ramificación se hace mayor terminamos con un árbol frondoso como un roble. Como acabamos de ver, nuestro gusto por los fractales generados matemáticamente debe mucho a nuestra biofilia por el entorno natural que nos rodea. Los árboles tienen formas «interesantes» que son estéticamente agradables. ¿Es posible que la base fractal para estas formas pueda captarse artificialmente de modo que resuene con el mismo sentido estético innato?

Hay un caso llamativo donde parece que esto ha sucedido. Es especialmente interesante porque el aspecto fractal sólo fue detectado más de cincuenta

años después de haberse establecido un consenso general de que la obra era artísticamente convincente. La obra en cuestión es el expresionismo abstracto de Jackson Pollock. En 1947 Pollock desenrolló un enorme lienzo blanco en el suelo de su estudio en un granero en el campo y empezó a dejar caer gotas y a salpicar pintura sobre el mismo. La pintura se vertía en un chorro continuo, de modo que el resultado fue una red compleja de líneas continuas que trazaban locas figuras ondulantes de varios colores.

Pollock se ha convertido en un ejemplo de arte abstracto para muchos no artistas. Uno le ama o le odia. Si le odia, suele pensar que un niño de tres años puede hacer lo que él hizo y no puede entender por qué sus obras se valoran hoy en 40 millones de dólares. De hecho, ningún otro artista moderno alcanza precios tan altos. Pero si uno mira muchas de las obras de Pollock en la galería al lado de otras obras de expresionismo abstracto, hay algo diferente en Pollock que no es fácil de captar. Y ciertamente es diferente de la obra de un niño. Hay una similitud entre una obra y otra pese a diferencias obvias en las pautas. La obra es abstracta y aparentemente aleatoria, pero posee una cualidad ordenada. Hay color pero su papel parece secundario. Entre 1947 y 1952, el período de sus mejores trabajos, Pollock solía calificar a sus cuadros como «orgánicos» en forma, sugiriendo una afinidad con pautas y complejidades naturales. Veía sus cuadros como ambientes especialmente creados sin ningún centro de atención, como enormes paisajes privados de símbolos y signos.

El misterio y atractivo de la obra de Pollock ha sido significativamente desentrañado por las investigaciones de Richard Taylor sobre su estructura fractal. Existen muchas películas que muestran a Pollock en acción sobre sus lienzos, y su técnica pone de manifiesto un orden en medio del caos aparente. El desarrolla la pauta por capas, que con el tiempo dejan de estar en contacto con el lienzo, lanzando pintura con jeringas y matraces, o pasando largos palos sobre el lienzo en movimientos de barrido.

Poco a poco fue dominando aspectos más sofisticados del método, que se basaban en utilizar pintura de la textura correcta. Tras una primera pauta que servía de base, Pollock incrementaba el detalle y la complejidad, trabajando a escalas más pequeñas. Había largos períodos de reflexión durante los cuales trabajaba en otros cuadros antes de volver a trabajar en los más antiguos. Odiaba la idea de acabar, y especialmente firmar, sus obras. Era como si eso señalara el fin de sus vidas. Los lienzos eran a veces estirados o sometidos a bombardeos con fragmentos pequeños. Para el observador, nada podía parecer más aleatorio.

Taylor, que era al mismo tiempo estudiante de arte y de física, decidió aplicar un sencillo análisis de reconocimiento de pautas a la obra de Pollock —afortunadamente no se necesitaban los originales— para descubrir si la intuición de Pollock estaba imponiendo alguna pauta que pasaba desapercibida para los críticos de arte tradicionales. El resultado fue bastante sorprendente. Descubrió que los cuadros de Pollock son fractales casi perfectos con un rango bien definido de fractalidad que evolucionó durante su carrera. La estructura fractal significa que estadísticamente los cuadros de Pollock parecen iguales si se los amplía o si se los reduce de tamaño. Decimos que sus pautas son «invariantes por escala». No tienen un tamaño definido. Uno no sería capaz de decir, sólo mirando, si está viendo un Pollock de tamaño real o una imagen reducida. Si usted compra uno, ¡córtelo en dos mitades y venda una de ellas!

Superponiendo a una imagen digital de un lienzo de Pollock una serie de cuadrículas cada vez más finas —como el antiguo papel cuadriculado que se utilizaba en las clases de aritmética en la escuela— podemos determinar cuántos cuadrados tienen pintura en ellos y cómo cambia este número a medida que aumenta la finura de la malla. Esta variación se denomina dimensión fractal. Varía entre los valores 1 y 2. Si la pauta es muy simple —una línea recta— entonces el número de cuadrados que tienen pintura en ellos decrecerá como L^{-1} a medida que aumentamos el tamaño de la malla,

L. Por el contrario, una línea muy retorcida y complicada que cubriera casi toda la superficie mostraría un cambio en el número de cuadrados cubiertos que decrece como L^{-2} cuando aumentamos el tamaño de la malla. El número D que aparece en la potencia L^{-D} es la dimensión fractal de la pauta. Nos dice cuánta información está contenida en la pauta. Una pauta de líneas rectas simples tiene D = 1 y es de tipo lineal. Sin embargo, la pauta complicada, aunque sigue estando generada por una línea, cubre un área bidimensional como si fuera bidimensional. A diferencia de la medida geométrica ordinaria de dimensión, ésta tiene la característica de que puede ser fraccionaria. Entre D = 1 y D = 2 hay toda una gama de pautas de complejidad intermedia con dimensión fraccionaria (por ejemplo, «fractal»). Se muestran algunos ejemplos en la Figura 3.10.

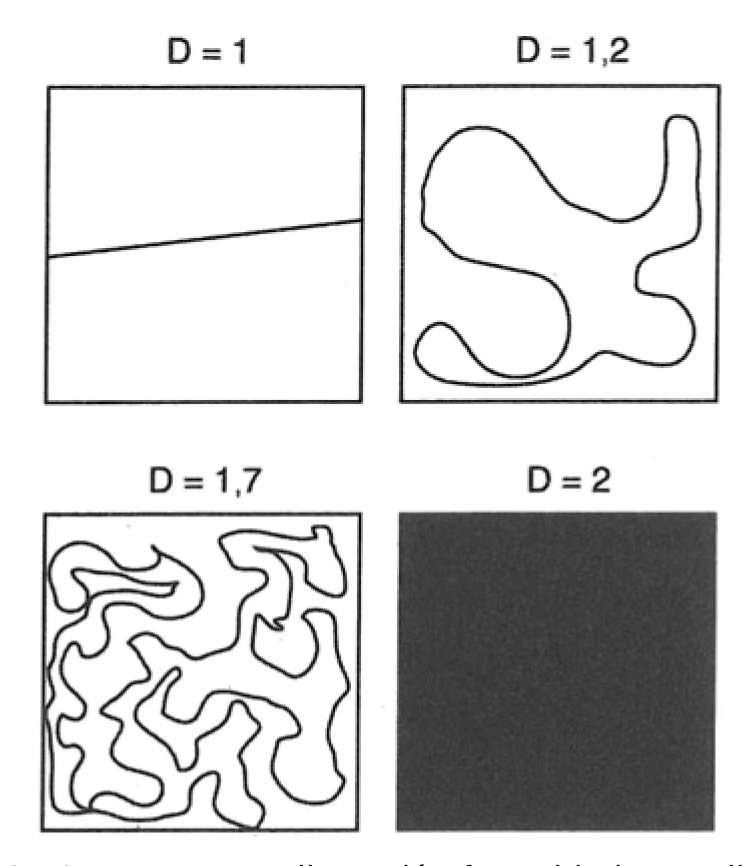
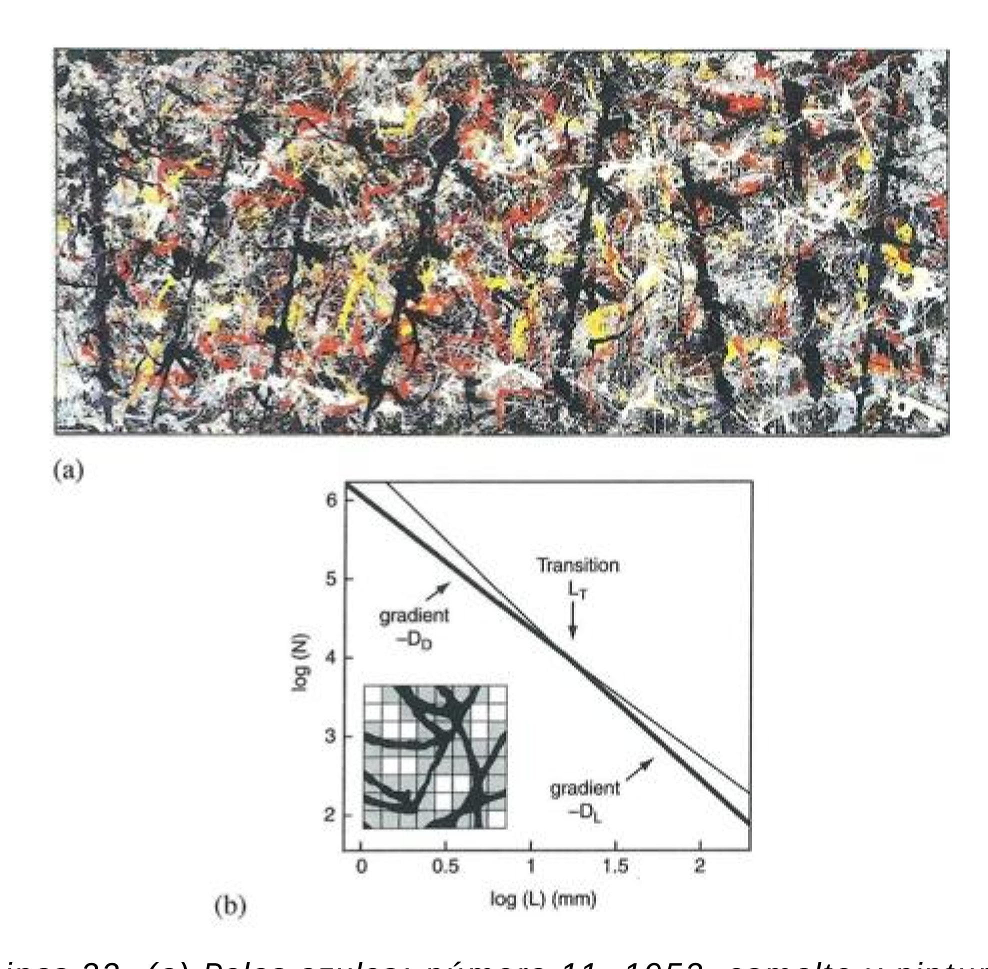


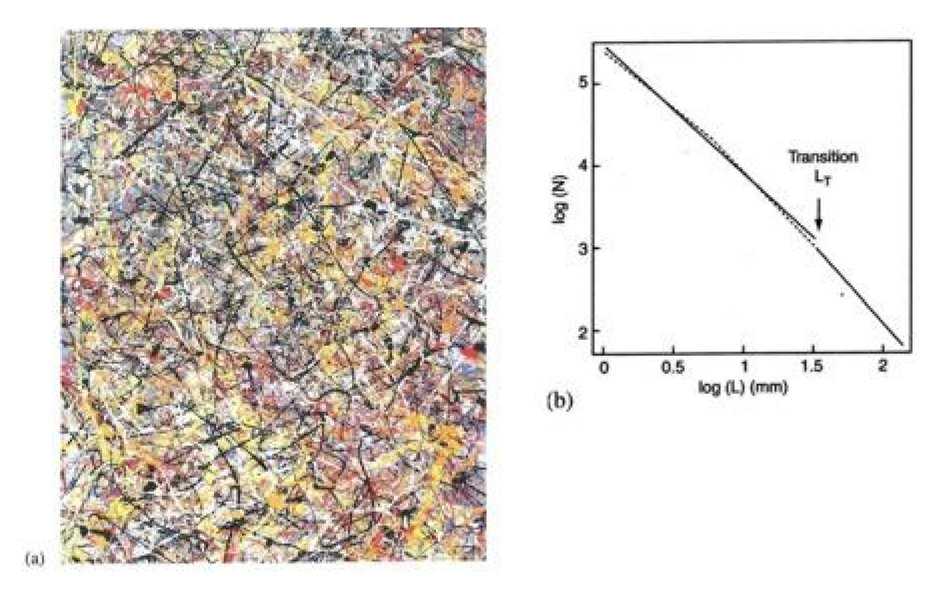
Figura 3.10. Pautas con dimensión fractal baja, media y alta.

Los resultados de las investigaciones de Taylor y sus colaboradores son sorprendentes. Las 23 obras de Pollock que analizaron seguían la regla L^{-D} de recuento de cuadrados característica de un fractal. Estos cuadros cubrían el período completo de su vida activa e incluían obras con una amplia gama de tamaños. Cuando los examinaron con más detalle, encontraron que hay dos procesos en curso en la obra de Pollock. Cuando se consideran las dimensiones más grandes de los lienzos, las películas que le muestran en acción revelan que está efectivamente arrojando pintura, utilizando los movimientos de su cuerpo para cubrir el lienzo desde escalas de unos pocos centímetros hasta casi dos metros. Pero, cuando miramos en escalas más pequeñas, desde milímetros a unos pocos centímetros, vemos los efectos del proceso de goteo. En consecuencia, en las dimensiones pequeñas, los índices fractales se acumulan en torno a 1,5 o 1,7, mientras que en escalas más grandes es de aproximadamente 1,95, lo que refleja la transición entre los dos comportamientos (véanse las Láminas 22 (a) y (b) y 23 (a) y (b)).



Láminas 22. (a) Polos azules; número 11, 1952, esmalte y pintura de aluminio sobre lienzo, 210 x 487 cm, pintada por Jackson Pollock en 1952 (The National Gallery de Australia, Camberra). (b) Después de cubrir una imagen escaneada de Polos azules; número 11, 1952 con una malla generada por ordenador, Richard Taylor y sus colaboradores contaron el número de cuadrados, N, en la capa de aluminio que contenían parte de la pauta como una función del tamaño del cuadrado L. Estos cuadrados llenos están sombreados en la muestra del recuadro. Los datos ponen de manifiesto una característica de toda la obra de Pollock: los 1000 datos son ajustados por dos líneas rectas —una para los datos a gran escala, la otra para los datos a pequeña escala—. El carácter de línea recta es indicativo de comporta miento fractal en cada una de estas regiones con una típica escala de transición, LT, de unos pocos centímetros. Estos dos regímenes son

generados por el uso de dos técnicas diferentes (goteo y barridos aleatorios) para crear las pautas a pequeña y gran escala.



23. (a) Una pintura a gotas de origen desconocido, esmalte sobre lienzo, 70 x 112 cm. (b) El análisis de la complejidad de la pauta de la capa de pintura negra en esta pintura anónima realizado por Richard Taylor y sus colaborado res utilizando el mismo método que para 22(b). A diferencia de un Pollock verdadero, los datos no quedan bien ajustados por líneas rectas ni en las escalas pequeñas ni en las grandes, como sería el caso para el comportamiento fractal sobre dichas distancias. Se han dibujado las dos líneas continuas que muestran las rectas que mejor se ajustan al comportamiento a pequeña y gran escala para forzar un empalme y dar una longitud de transición de Lr = 3 cm.

Estos estudios revelan que Jackson Pollock había intuido las características de los fractales mucho antes de que Benoit Mandelbrot atrajera la atención del público hacia estos objetos matemáticos y les diese su nombre. Los fractales tienen pautas en todas las escalas y el ojo no es atraído a ninguna particular escala dominante de pautas estadísticas. Pollock fue extraordinariamente perceptivo en su identificación visual de este aspecto estadístico a partir de la experiencia. Si se hace un análisis similar de la pintura sobre el suelo del estudio de Pollock —las gotas que no cayeron en el

lienzo— es reconfortante descubrir que no siguen una pauta fractal. Las pautas de Pollock no son casuales.

Las obras de Pollock son fractales con un alto grado de exactitud, tanto que Taylor y sus colegas han tomado parte en la autentificación de una obra de Pollock de origen desconocido y en el descarte de otras como Pollocks auténticos basados en la presencia o ausencia de pautas fractales distintivas y transiciones entre estructura a pequeña escala y gran escala (véanse las Láminas 22 (a) (b) y 23 (a) (b)). Hasta ahora, diez cuadros no atribuidos de colecciones en Estados Unidos han sido analizados con la esperanza (de sus propietarios) de que pudieran ser auténticos Pollocks. Lamentablemente, ninguno tiene las firmas fractales de Pollock en escalas pequeñas y grandes. Superficialmente, estas obras se parecen a las verdaderas. Tienen un colorido y un estilo rudo que podría ser confundido con el de Pollock. Pero sólo un análisis fractal se centra en el ingrediente clave de Pollock que revela su auténtico pedigrí.

Guerra y paz. Tamaño y cultura

Joe Gillis: «Usted salía en las películas. Usted era grande».

Norma Desmond: «Yo soy grande. Son las películas las que se han hecho pequeñas».

CHARLES BRACKETT,

El crepúsculo de los dioses (película, 1950)

Ha habido muchos intentos de crear fantasías pobladas por gigantes o enanos: el gigante Desesperación de John Bunyan y los viajes de Gulliver entre los minúsculos liliputienses y los gigantescos brodingnagianos han entretenido a lectores durante siglos (Figura 3.11). En tiempos modernos, se

les han unido ejércitos de insectos gigantes y superhéroes que caminan por las páginas de los cómics que sirvieron de base a un millar de horribles películas de Serie B en los años cincuenta del siglo pasado. Lamentablemente, estos seres exagerados no soportan un diseño estructural.



Figura 3.11. Gulliver en Lilliput, por C. E. Brock, 1894.

El hecho de que la resistencia no cambia al mismo ritmo que el volumen y el peso significa que si aumentamos la escala del cuerpo humano entero, es muy probable que se rompa cuando alcance unos 300 kilos de peso. Para soportar un peso mayor en un estado de movimiento tendría que ser rediseñado —con huesos más cortos y más anchos, pies más anchos y

órganos internos muy diferentes— para proporcionar la potencia extra necesaria para mover el monstruo.

Evidentemente, nuestro tamaño —y somos las criaturas más grandes que caminan sobre dos patas— ha influido en muchos aspectos de nuestro desarrollo tecnológico y social, tanto para bien como para mal. Es posible incluso argumentar que nuestro tamaño ha sido el factor más importante en nuestro desarrollo de la tecnología compleja, y las muchas actividades sociales, culturales y artísticas que derivan de ella. Somos suficientemente grandes, y con ello suficientemente fuertes, para llevar herramientas que pueden transferir energía suficiente para romper rocas y deformar metales. Ésta es una consecuencia de nuestro gran tamaño. A medida que disminuye la escala de una criatura viva, aunque pueda ser relativamente más fuerte en términos del número de sus propios pesos corporales que puede levantar, su resistencia absoluta decrece.

La resistencia de las rocas y los metales está determinada por la intensidad de las fuerzas electromagnéticas de la Naturaleza y por las masas de protones y electrones. Cuando el tamaño de una criatura cae por debajo de un nivel crítico, no será capaz de romper los enlaces moleculares en los materiales sólidos. Nuestro propio tamaño nos ha permitido cincelar y excavar rocas, tallar la madera y forjar los metales. Gracias a estos medios, nuestro gran tamaño nos ha permitido explotar el ambiente de formas que están próximas a las de los organismos más pequeños. Por supuesto, con el paso del tiempo hemos desarrollado ayudas artificiales para cortar y dar forma a materiales duros, de modo que ya no estamos limitados por la resistencia de nuestros cuerpos. Pero estas sofisticadas capacidades secundarias no pueden aparecer sin el uso anterior de la fuerza manual. Evidentemente, la evolución de nuestra posición bípeda única fue importante pues permitió el desarrollo de nuestra destreza manual. También desempeñó un papel importante en facilitar nuestra movilidad. No sólo nos da más agilidad, sino que en las primeras etapas del proceso evolutivo hizo posible

que las criaturas se mantuvieran frías en climas cálidos de forma más eficiente que si hubieran caminado a cuatro patas. Durante las horas de luz diurna en los trópicos se expone menos superficie para absorber radiación y, al estar más lejos del suelo, la cabeza (y con ella el cerebro que contiene) se mantiene significativamente más fría soportada sobre dos patas que sobre cuatro.

Pero también podemos utilizar dichas herramientas como armas que transfieren cantidad de movimiento suficiente para matar a otros seres vivos, ya sea para procuramos alimento, para protegemos o por ninguna razón en absoluto. Una vez más, resulta que nuestro tamaño es apropiado para matar animales pequeños con armas sencillas, como piedras o toscas mazas. Nuestra capacidad para asestar golpes letales a congéneres humanos es también una consecuencia de nuestro tamaño. El alcance y consecuencias de las acciones violentas, que llevan finalmente a la guerra, derivan de un nivel concreto de resistencia que varía de la misma forma que nuestro tamaño. Si nuestro tamaño fuera sólo una cuarta parte del real, nuestra historia sería de hecho muy diferente.

Nuestra capacidad para utilizar el fuego también está relacionada con nuestro tamaño. Hay un tamaño mínimo para una llama que arde en el aire, porque la superficie que encierra un volumen de material ardiente determina el aporte de oxígeno que puede sostener la combustión. Cuando disminuye el volumen que arde, la superficie disminuye más rápidamente y el fuego está cada vez más hambriento de oxígeno. Finalmente se alcanza un límite, de aproximadamente medio centímetro, por debajo del cual la llama no puede mantenerse. El inicio de la combustión requiere una temperatura de algunos centenares de grados Celsius. Si la temperatura cae por debajo de este valor, la llama morirá. Por consiguiente, el tamaño de la llama debe ser suficientemente grande para mantener la temperatura de combustión en presencia del aire frío que entra del exterior. Si la llama es demasiado pequeña, entonces dichas corrientes de aire la enfriarán lo suficiente para

extinguirla. De hecho, sabemos que cualquier llama es vulnerable a la extinción por fuertes corrientes de aire de este tipo, y por eso protegemos nuestros primeros intentos cuando encendemos una fogata. Para mantener las llamas cerca de los límites inferiores de viabilidad, necesitamos hacer uso de un combustible que sea muy volátil. Se requiere un tipo de gas (como metano) o líquido inflamable (como parafina o alcohol metílico). Si quisiéramos mantener un fuego de hojas, carbón, madera o turba, lo que sería el escenario más realista para una cultura primitiva, el tamaño crítico sería mucho mayor. Es una agradable coincidencia que los fuegos de carbón, madera o turba tengan que tener un tamaño, mínimo para mantener la temperatura de ignición de los materiales bajo las condiciones, atmosféricas típicas, y ese tamaño mínimo es precisamente el requerido para mantener caliente a un ser humano en un abrigo natural de tamaño conveniente.

Estas consideraciones ponen una restricción a lo pequeño que se puede ser y seguir haciendo uso del fuego. Si no hubiera límite al tamaño de una llama que pueda arder en el aire, entonces las criaturas muy pequeñas podrían utilizar el fuego para proveerse de calor, empezar a desarrollar tecnologías y cambiar sus entornos. Pero, puesto que hay una llama mínima, las criaturas muy pequeñas tienen que enfrentarse a grandes fuegos incontrolables si quieren alimentarlos con combustible. Su incapacidad para controlar el fuego no es sólo crucial para impedirles desarrollar diversas formas de tecnología; también puede limitar su diversidad. No pueden dispersarse a regiones en donde las fluctuaciones climáticas sean grandes, no pueden poblar regiones en las que la temperatura media sea muy baja, y sus actividades están restringidas a las horas diurnas si sus sensores receptores de luz responden solamente a la luz visible.

El uso del fuego por los seres humanos es universal. Encontramos pruebas del uso sistemático del fuego hace cien mil años, y de la explotación de los fuegos naturales hace casi un millón y medio de años. Su mayor ventaja es la posibilidad de hacer una barbacoa. La cocción hace que el alimento sea

más fácil de consumir y digerir, mata bacterias nocivas y permite que la comida se conserve durante más tiempo. Estos factores gastronómicos sirven para ampliar la gama de alimentos disponibles para los humanos que hacen fuego, mejorar su salud y reducir el espacio en el que necesitan buscar presas apetitosas. Cocinar estimula también la aparición de un sentido del gusto selectivo. La carne puede cocinarse de varias maneras; su gusto difiere del de la carne no cocinada[18]. Los matices del gusto que crea la cocina, y la división del trabajo que implica, han desempeñado claramente un papel en la evolución social humana. Sólo los homínidos practicaban la cocina y, a diferencia de otros animales, nosotros nos molestamos en hacer que la comida parezca agradable además de tener buen gusto. Así pues, la capacidad de hacer y controlar el fuego abre otros caminos evolutivos a una especie. Altera la gama de alimentos que puede explotar y los beneficios nutricionales a ganar de ellos. Aumenta la longitud de la vigilia, proporciona seguridad contra los predadores y proporciona un medio de limpiar la tierra y ahuyentar animales. También se ha sugerido que la transición a una dieta de alta calidad, con comida fácilmente digerible, que propició la cocción puede haber desempeñado un papel en la rápida evolución del cerebro. El cuerpo humano manifiesta dos anomalías con respecto a su tamaño global: el cerebro humano es relativamente grande mientras que el estómago humano es muy pequeño. Lo último es una señal de que la dieta humana no requería enormes capacidades digestivas. De este modo, quedaba energía disponible para reforzar la costosa expansión del cerebro. Esto quizá no hubiera sido posible si se hubiesen requerido grandes cantidades de energía para la digestión.

Uno de los desarrollos más importantes en la historia humana fue la innovación de la palabra escrita, junto con el uso del papiro, el papel y otros

[18] Seguimos identificando la cocina y los hábitos de comida como una forma de distinción social. Ésta no es una innovación reciente: los indios algonquinos del nordeste de América menospreciaban a sus vecinos del norte llamándoles «comedores de carne cruda», es decir, «esquimales».

materiales ligeros para su representación y almacenamiento. Para hacer uso de materiales como el papel, es necesario ser grande. Las criaturas pequeñas como las moscas y los lagartos explotan las fuerzas adhesivas entre moléculas porque estas fuerzas de superficie son más fuertes que la gravedad sobre áreas muy pequeñas. Las criaturas más grandes no pueden utilizar fuerzas de superficie adhesivas para vencer la gravedad porque sus pesos son demasiado grandes. Pero esas mismas fuerzas de superficie que ayudan a las criaturas minúsculas a desafiar la gravedad hacen que no puedan manipular superficies. Uno no puede volver las páginas de un libro por pequeñas que sean si se le pegan las superficies de las páginas. Por supuesto, también pueden idearse estrategias que podrían utilizarse *hoy* para superar este problema (cubrir las páginas con algún detergente transparente especial que reduzca espectacularmente la adhesión superficial, de la misma forma que un detergente para lavar hace que la grasa no se pegue a los platos). Pero tal situación compleja no se produciría espontáneamente, ni existiría como primer paso en el desarrollo de los medios de registro de información.

La existencia de fuerzas superficiales es la razón por la que hay una abrupta división entre el comportamiento de los seres vivos por encima y por debajo de una dimensión de unos pocos milímetros. Por encima de esta divisoria, la gravedad domina, mantiene nuestros pies firmemente en el suelo y, en definitiva, pone un límite a lo grande que podemos hacernos. Por debajo de dicha escala, la vida está dominada por la presencia de fuerzas adhesivas que pegan las superficies y superan a la fuerza de la gravedad (Figura 3.12). En la vecindad de la línea divisoria, los equilibrios que son posibles entre gravedad y fuerzas adhesivas dan lugar a una enorme profusión de seres vivos.

Esta región ofrece una sorprendente diversidad de posibilidades de supervivencia y nichos evolutivos que no están sometidos a presión. Ya decida uno caminar sobre el agua, por el techo o cabalgar sobre la piel de

otros animales, todos esos estilos de vida sólo son posibles allí donde las adhesividades intermoleculares pueden igualar a la intensidad de la gravedad.

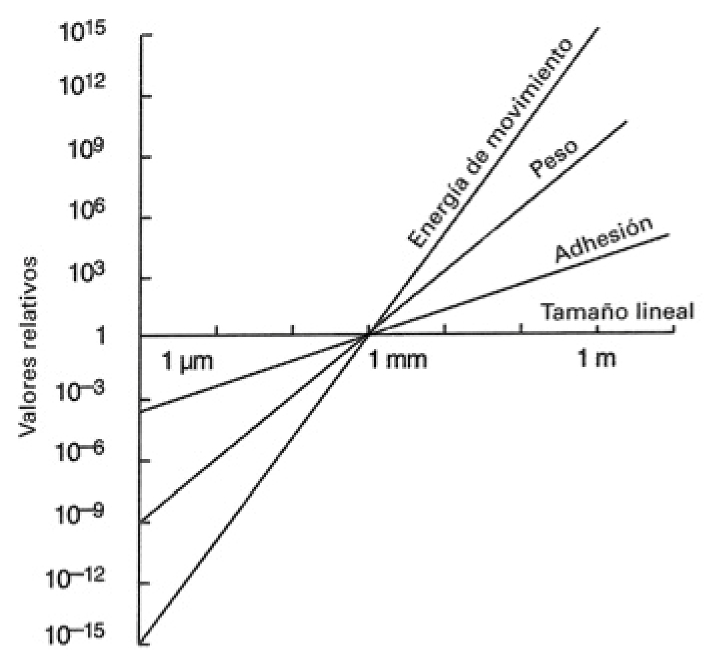


Figura 3.12. Variaciones en energía de movimiento, intensidad de adherencia superficial y peso con el tamaño medio: La escala donde las tres intensidades coinciden está densamente poblada por organismos minúsculos.

Sin embargo, no todo son ventajas en este mundo submilimétrico. Las ruedas son menos que útiles: sus superficies sentirían la atracción de las fuerzas superficiales y rodarían como si hubiera frenos continuamente. No serían adaptativas[19].

Lejos del mundanal ruido. El tamaño de las poblaciones

Los mansos heredarán la Tierra.

SAN MATEO

---

[19] De todas formas, aunque la rueda parezca parte integral de nuestra cultura, han existido culturas avanzadas, como los mayas (750 d. C.), que nunca la inventaron. No conozco ningún ejemplo en donde la rueda haya evolucionado en organismos vivos. La mejor aproximación es la hélice molecular que proporcionan los flagelos de las bacterias.

El tamaño es una clave para la supervivencia. Los animales pequeños son comunes; los grandes, especialmente los predadores feroces, son raros. Y si examinamos ecosistemas particulares, encontramos que los tamaños de los animales no varían continuamente sobre todas las posibilidades. Parecen acumularse alrededor de escalones definidos en una escala de tamaños creciente. Esta estratificación refleja la naturaleza predadora de la existencia animal: se ha alcanzado un equilibrio en el que, hablando en general, cada criatura encaja en la boca de una criatura más grande, y se alimenta de otras suficientemente pequeñas para que encajen en la suya. La misma pauta de abundancia creciente con el tamaño decreciente se encuentra a lo largo de todo el mundo viviente hasta que los organismos se hacen tan pequeños que sería necesario un rediseño estructural para que evolucionasen en la dirección de tamaños aún más pequeños (Figura 3.13).

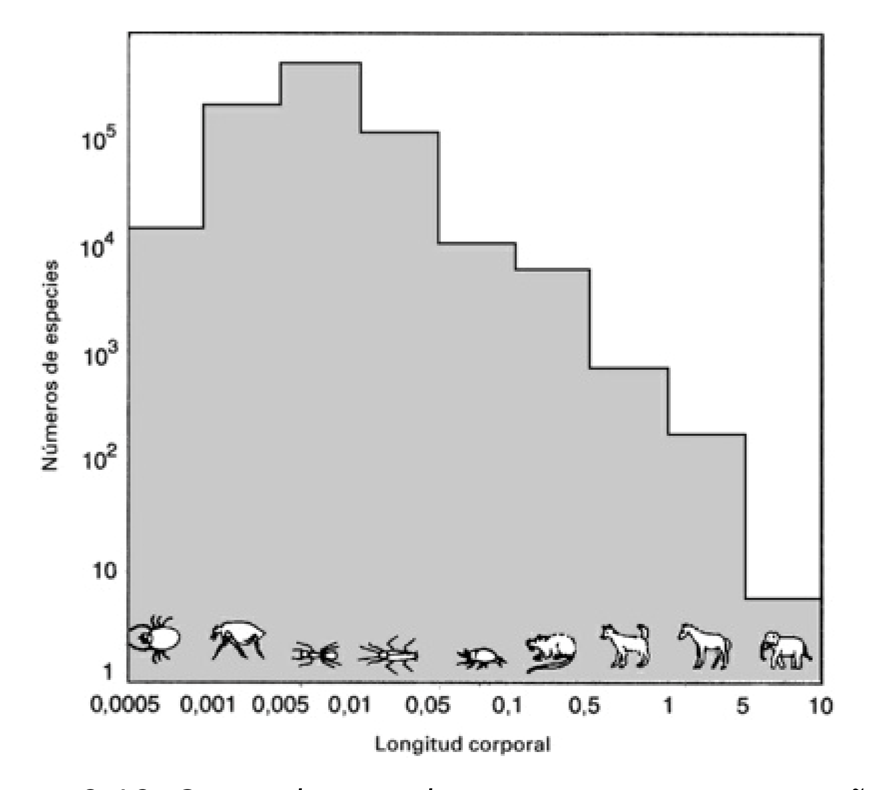


Figura 3.13. Censo de especies terrestres versus tamaño.

De entrada se podría pensar que esta tendencia descendente en la abundancia de criaturas más grandes es totalmente geométrica. Debe haber criaturas más pequeñas antes que criaturas más grandes, simplemente porque se pueden hacer más cosas pequeñas que cosas más grandes con la misma cantidad de tejido vivo. Pero ésta no es una explicación suficiente. Si miramos cómo está invertida la biomasa total en la Naturaleza a lo largo del espectro de tamaños de los seres vivos, descubrimos que la tendencia «lo pequeño es mejor» se hace todavía más impresionante (Figura 3.14).

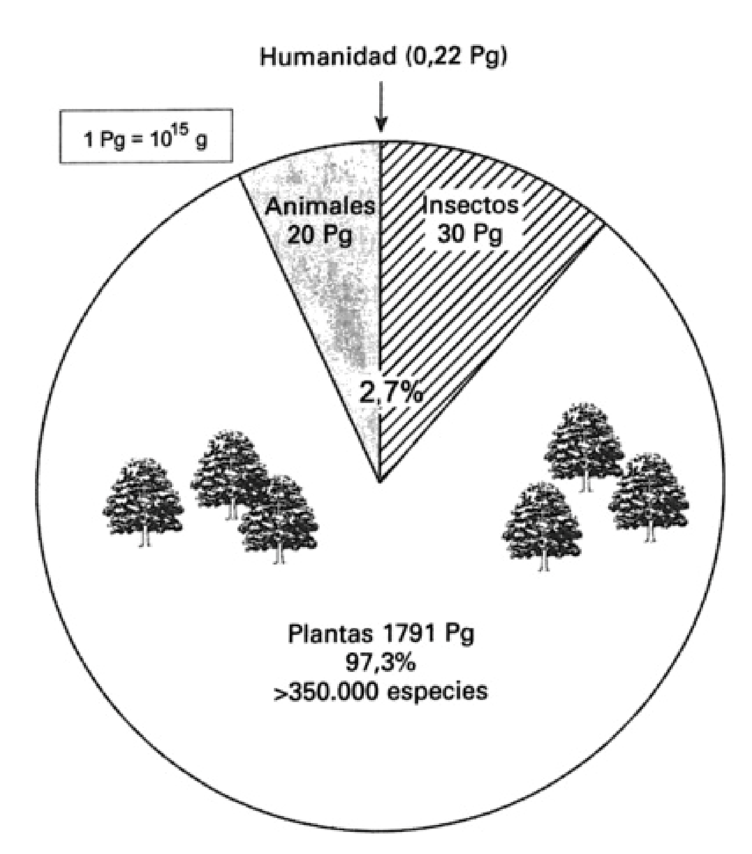


Figura 3.14. Composición de la biosfera. La masa total de materia viva se estima en 1841 petagramos (donde un petagramo = 10^{15} gramos es aproximadamente igual a la masa de un kilómetro cúbico de agua). De dicho total, sólo 4 Pg se encuentra en los océanos, pese al hecho de que cubren dos tercios de la superficie de la Tierra; el resto se encuentra sobre tierra. Se divide entre animales, insectos y plantas en las cantidades mostradas. Se estima que hay más de 1,2 millones de especies de criaturas vivas

(excluyendo al menos 100 000 microorganismos) de las cuales al menos 800 000 son insectos. Como puede verse, la biomasa está totalmente dominada por árboles (97,3 por 100) y la masa de la humanidad es despreciable (0,01 por 100) comparada con la de otros animales e insectos.

La estrategia inversora de la selección natural consiste en poner sus recursos en los cuerpos de las plantas y en animales pequeños antes que en los grandes. Parece que el Todopoderoso, en palabras de J. B.S. Haldane, «ha tenido un gusto desmedido por los escarabajos».

Ya hemos visto que las intensidades intrínsecas de las fuerzas de la Naturaleza determinan los tamaños máximos hasta los que pueden crecer los seres vivos en la superficie de un planeta que soporte la vida. Pero ¿por qué el planeta no está lleno de criaturas grandes que exploten al máximo ese límite superior de tamaño? ¿Qué es lo que determina cuánto pueden acercarse al límite y en qué cantidad es probable que lo hagan?

Una restricción la proporciona la ubicua segunda ley de la termodinámica. Ésta, recordará el lector, es la expresión científica de la experiencia familiar de que las cosas tienden a ir de lo malo a lo peor. Afirma que, en un entorno cerrado, el desorden nunca puede disminuir. La razón para esta calle de dirección única es simplemente que hay muchas más maneras en las que un sistema puede evolucionar de orden a desorden, antes que a la inversa, y por ello es aplastantemente probable que los sistemas en conjunto tiendan a hacerse cada vez más desordenados.

La energía no puede crearse ni destruirse, pero inevitablemente se degrada a formas cada vez menos útiles. Si uno inicia un proceso industrial en el que el producto de una etapa se utiliza para alimentar la siguiente, entonces la razón de producción de energía utilizable a energía entrante decrecerá en cada paso sucesivo. Las máquinas de movimiento perpetuo son imposibles. En la práctica, podemos romper el ciclo de degradación inyectando una energía altamente ordenada (como potencia eléctrica) en alguna etapa del

proceso, pero eso significa que el sistema en consideración ya no es cerrado. Estas restricciones termodinámicas se aplican con la misma fuerza a la energética del mundo viviente. Podemos considerar la biosfera como una línea de producción en la que una enorme abundancia de plantas es comida por insectos, que a su vez son consumidos por otros más grandes, que son presa de animales pequeños, que proporcionan el almuerzo para otros más grandes, y así sucesivamente. En cada nivel de esta pirámide, la energía de los alimentos disponible se divide en excrementos, mantenimiento de los procesos vivos y producción de descendencia. Sólo una fracción de la energía que entra en un nivel de la cadena alimenticia queda para los predadores que se alimentan de ella. Cada nivel de la cadena alimenticia actúa como un mezquino avaricioso: toma su ración de los recursos energéticos que recibe antes de transmitirlos. Cuando subimos por la pirámide, y entramos en el dominio de los predadores más grandes, no quedan demasiadas calorías. La segunda ley de la termodinámica está degradando la energía en cada eslabón de la cadena alimenticia. Vemos así que las criaturas mayores se enfrentan con el final de una cuña cada vez más estrecha (Figura 3.15).

Los animales grandes en la cima de la cadena alimenticia están utilizando solamente una pequeña fracción de la energía alimenticia que hay por debajo de ellos en la cadena, y por eso no pueden ser tan abundantes como sus presas más pequeñas. Las cantidades relativas de animales de diferentes tamaños reflejan la pequeña fracción de la energía alimenticia a la que tienen acceso en el eslabón de la cadena que hay inmediatamente debajo de ellos. Además, vemos que las especies mayores están pilladas entre dos fuegos porque, a medida que las especies se hacen más grandes, tienen que alimentarse de criaturas cada vez más feroces, o más ágiles, sólo un poco más pequeñas que ellas. Para atraparlas, necesitan hacer una fuerte inversión de sus escasos recursos en armas ofensivas y deben practicar un comportamiento más energético. Un guepardo puede ser rápido, pero vive muy cerca de la bancarrota energética porque sus persecuciones a alta

velocidad son muchas veces infructuosas y derrochan enormes cantidades de energía.

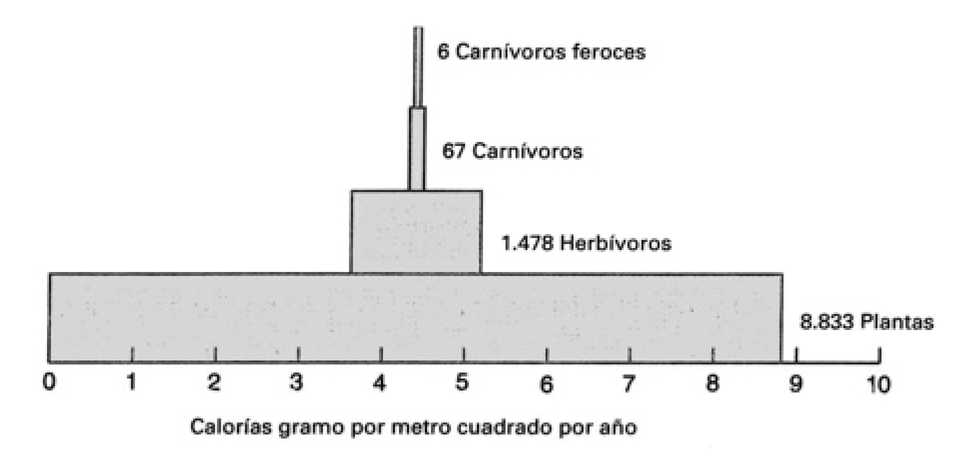


Figura 3.15. La pirámide de la cadena alimenticia de un entorno particular. En la base están las especies de vida vegetal que obtienen energía a partir de fotosíntesis. Su valor calorífico es explotado por criaturas herbívoras, que a su vez son devoradas por carnívoros de tamaño y ferocidad crecientes. Datos recogidos por H. T. Odum en Silversprings, Florida.

Vemos así por qué habrá un límite superior para los tamaños de los predadores. Los dragones se enfrentan a una ley de rendimientos decrecientes. Los recursos alimenticios disponibles para ellos disminuyen finalmente hasta estar por debajo de los requeridos para mantenerlos. Por esta razón, la abundancia de especies diferentes decrece cuando su tamaño aumenta: su cantidad está determinada por el número de calorías alimenticias disponibles para ellos en su nivel de la cadena alimenticia. Las excepciones a este argumento general son pocas y reflejan la adopción de una estrategia inusual que puentea niveles de la cadena alimenticia. Los elefantes y los pandas gigantes se alimentan de plantas, y con ello prescinden de intermediarios en forma de pequeños animales. Incluso así, los pandas pasan la mayor parte de sus horas de vigilia comiendo simplemente para sobrevivir. Su fuente de alimento es el bambú, que es

único en su hábitat porque está disponible todo el año. Es interesante que los pandas tienen dientes de carnívoros, y quizá en otro tiempo hayan sido comedores de carne u omnívoros que sólo sobrevivieron adoptando una estrategia consistente en comer plantas en la base de la cadena alimenticia. Las grandes ballenas también se alimentan en el fondo de la cadena alimenticia, pero por medios que no están disponibles para las criaturas que se mueven sobre la tierra. Filtrando enormes volúmenes de agua, pueden extraer grandes cantidades de krill y gambas sin gastar mucha energía en la caza, y tampoco gastan energía para escapar de los predadores naturales. Su único enemigo es el hombre. Su suministro de alimento también muestra una enorme abundancia y se recupera con mucha rapidez. Algunos autores, como Paul Colinvaux y Beverly Halstead, han afirmado que los dinosaurios de ferocidad legendaria, como el *Tyrannosaurus rex,* vivían en realidad vidas relativamente inactivas para conservar preciosas calorías alimenticias. Evitaban gastar su energía en la caza de presas ágiles y centraban su atención en animales incapacitados y carroña. Con el tiempo, salieron perdiendo frente a criaturas más pequeñas y más rápidas, que eran mucho más eficientes limpiando estas presas fáciles. Estos argumentos parecen débiles. Los dinosaurios como el *Tyrannosaurus rex* no tienen el diseño biomecánico de los perezosos que se mueven pesadamente; en su lugar, parecen equipados para correr a velocidades de hasta 65 kilómetros por hora y andar hasta 16 kilómetros por hora. Tampoco sus enormes dientes y mandíbulas parecen el punto final de una adaptación a una existencia carroñera. Parecían carnívoros, y si esos equipamientos del estilo de vida carnívoro hubieran dejado de ayudar a la supervivencia y la fecundidad, habrían tenido tiempo de sobra para perderlos durante su largo período de adaptación exitosa al entorno —una adaptación que sólo parece haber fallado cuando se tuvieron que enfrentar a un drástico cambio medioambiental que acabó con la mayoría de los seres vivos—. Hay otras posibilidades que podrían servir para explicar el hecho enigmático de que, cuando terminó la

era de los dinosaurios gigantes, éstos nunca fueron sucedidos por mamíferos carnívoros de un tamaño similar. Quizá ser más grande y más fiero se hizo termodinámicamente imposible en la nueva situación en la que había cambiado el espectro de criaturas más pequeñas.

Independientemente de los dinosaurios, nuestro argumento termodinámico general muestra por qué las calorías se hacen cada vez más escasas a medida que se sube por la cadena alimenticia. Finalmente, las calorías alimenticias disponibles caerán por debajo del nivel de subsistencia para el modo de vida necesario para reunirías. Por ello, el tamaño de los carnívoros más grandes dependerá del porcentaje que extrae cada predador de la cadena alimenticia y de la cantidad total disponible en la base de la cadena. Las eficiencias de extracción no cambian mucho cuando se sube por la cadena, y están determinadas en definitiva por aspectos invariantes de la bioquímica. El factor dominante es la cantidad de energía útil disponible en las plantas en la base de la pirámide. Esto fija el máximo al que pueden estirarse las reservas de energía utilizable.

La piedra fundamental de toda la pirámide de la vida es la cantidad de energía solar disponible en la superficie de la Tierra, combinada con la eficiencia con la que puede incorporarse en las plantas por el proceso de fotosíntesis. Este proceso es en promedio muy poco eficiente. Sólo alrededor de un 1 por 100 de la energía solar entrante es utilizada para producir azúcares en las plantas.

Las razones para esta poca eficiencia —veinte o treinta veces menor que las buenas máquinas hechas por el hombre— son diversas. Sólo una fracción de los rayos solares cae en bandas de longitud de onda suficientemente energéticas para desencadenar reacciones fotoquímicas. El resto no hace más que calentar ligeramente las superficies de las plantas. Los niveles de intensidad en las diversas bandas de onda recibidas por las plantas terrestres están determinados por la astrofísica interna del Sol y por su distancia a la Tierra. Pero el eslabón débil en la cadena de la fotosíntesis, que es

responsable del uso ineficiente de la energía solar por las plantas, es la falta de la materia prima que utiliza la fotosíntesis para hacer azúcares alimenticios: el dióxido de carbono. Sólo un 0,03 por 100 de nuestra atmósfera terrestre está en forma de dióxido de carbono. Este es el cuello de botella que impide que entre más energía solar en la cadena alimenticia. Incluso si aumentara enormemente la intensidad de la luz solar, la eficiencia de la producción de azúcar apenas cambiaría, porque no hay suficiente dióxido de carbono para explotar la luz solar extra[20].

Así pues, debido a la escasez de dióxido de carbono, la energía alimenticia total disponible en la base de la cadena alimenticia para que los predadores tomen una rebanada en la parte superior de cada nivel es sólo de un 1 por 100 de la energía solar total que cae en la superficie de la Tierra. En definitiva, el tamaño máximo de los predadores, y su rareza, es un reflejo de la escasez del dióxido de carbono en la atmósfera de la Tierra.

Estas consideraciones revelan algo más que la razón por la que los animales grandes son más raros que los pequeños. La necesidad de los animales de extraer alimento de su entorno, alimentándose de otros más pequeños, asegura que los animales grandes también necesitan cazar y pastar sobre un espacio muy amplio. Como resultado, cabría esperar que la densidad de población de animales decrezca con su tamaño, y así lo hace realmente, como puede verse en la Figura 3.16.

---

[20] Como cabría esperar, cuando las plantas crecen en condiciones artificiales, con más dióxido de carbono añadido al aire, hacen un uso más eficiente de la luz solar incidente.

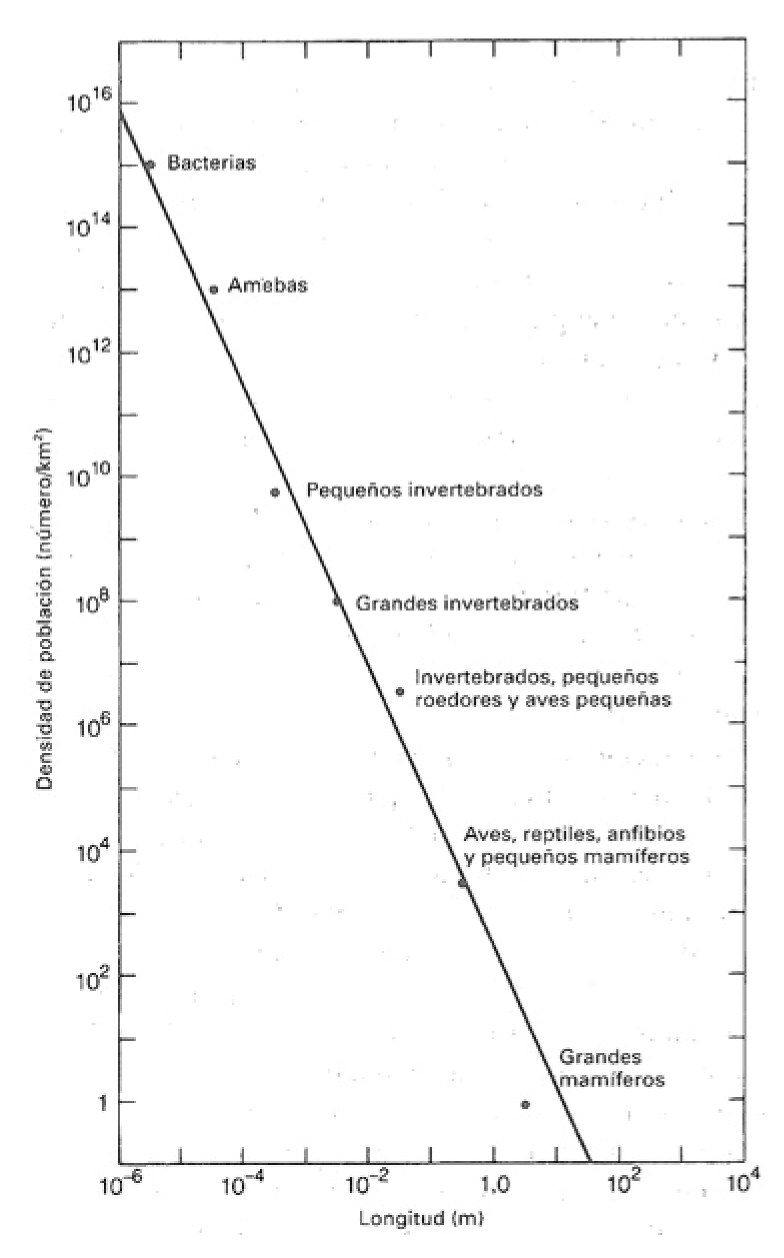


Figura 3.16. Densidad de población de criaturas vivas de diferentes tamaños. Si examinamos la distribución reciente de grandes animales carnívoros, encontramos que cubrían continentes enteros (y a veces más de un continente) antes de que la intervención humana se convirtiera en un serio peligro para ellos (véase la Tabla 3.1).

TABLA 3.1. Espacios demográficos de los predadores feroces

León (*Panthera leo*)	De Balcanes y Arabia a la India cen-tral, casi toda África
Tigre (*P. tigris*)	Gran parte de Eurasia
Leopardo (*P. pardus*)	Gran parte de África y Eurasia
Jaguar (*P. onça*)	De sur de Estados Unidos a norte de Argentina
Leopardo de las nieves (*P. uncia*)	Areas montañosas desde Afganis-tán al lago Baikal y este del Tibet
Guepardo (*Acinonix jubatus*)	De Oriente Medio a la India cen-tral, África excepto el Sahara cen-tral y las selvas tropicales
Puma (*C. latrans*)	De casi toda América del Norte al sur de Chile y Patagonia
Hiena moteada (*Crocuta crocuta*)	África subsahariana excepto en sel-vas tropicales
Lobo gris (*Canis lupus*)	Casi toda Eurasia y América del Norte
Perro cazador (*Lycaon pictus*)	Casi toda África
Oso negro asiático (*Ursus thibeianus*)	Casi toda Asia central y oriental
Oso negro americano (*U. americanus*)	Casi toda América del Norte
Oso pardo (*U. arctos*)	Casi toda Eurasia (excepto las re-giones tropicales), norte de África, casi toda América del Norte
Oso polar (*U. maritimus*)	Eurasia ártica y América del Norte

Esta tendencia demográfica crea otro problema para los animales grandes: necesitan estar muy dispersos para que haya suficientes presas para satisfacer las necesidades energéticas de cada uno, pero si los miembros de una especie están muy dispersos, no encontrarán parejas potenciales con la frecuencia suficiente para mantener un nivel de población viable. Puesto que los animales grandes tienden a tener camadas pequeñas y dedican largos períodos de tiempo a alimentar a sus crías hasta la edad fértil, están doblemente sometidos a las presiones de las bajas densidades de población. En islas, o en masas de tierra continental, donde los límites de los terrenos de caza disponibles pueden estar impuestos por lagos o cadenas montañosas, es probable que la rareza de los grandes, predadores sea exacerbada por las restricciones contrapuestas que imponen la necesidad de oportunidades de cría adecuadas y la de suministros alimenticios suficientes.

Ambas se combinan para hacer que la supervivencia de los animales grandes sea bastante precaria.

Aumentar el tamaño conduce también a inflexibilidad y sobrespecialización. Aunque el tamaño grande protege acertadamente a los organismos de cambios pequeños en su ambiente, los pone en riesgo de otros mayores. Cuando llega el desastre, necesitan un tiempo más largo para recuperarse debido a sus camadas pequeñas y al hecho de que el tiempo de reproducción sexual aumenta con el tamaño del animal (Figura 3.17).

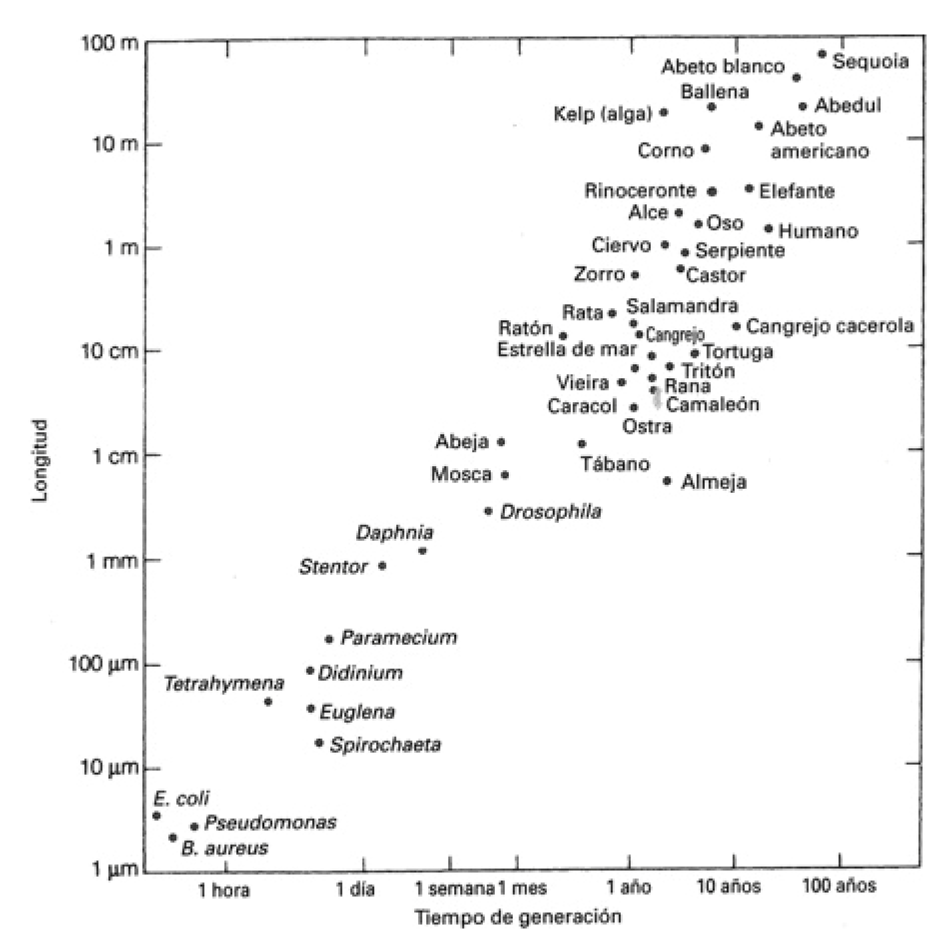


Figura 3.17. Variación con el tamaño corporal del tiempo requerido para producir una primera camada.

Su largo ciclo reproductivo significa que las criaturas grandes cambian más lentamente que las pequeñas, porque los cambios genéticos sólo pueden

ocurrir durante la etapa unicelular del ciclo vital. Se necesitan cambios mucho más pequeños para producir un efecto apreciable en un animal grande. A medida que vamos del Ecuador a los polos, vemos que la diversidad animal decrece con la predecibilidad del clima. Los cambios estacionales se hacen más severos y abruptos; la rápida congelación y el rápido deshielo del agua se hacen habituales y erráticos, igual que sucede a medida que subimos a una montaña. Al pie de las montañas, la vida sigue siendo relativamente diversa pero, cuando ascendemos, la creciente severidad e impredecibilidad de los cambios de temperatura lleva a una variedad cada vez menor. En general, los entornos cambiantes o peligrosos favorecen a los organismos que producen mucha descendencia y tienen tiempos de generación cortos. Por el contrario, los ambientes benignos favorecen a los organismos con poca descendencia y largos tiempos de generación, cuyas crías pueden situarse en nichos ecológicos favorables para cuya explotación están bien equipadas. La relativa vulnerabilidad de los animales grandes frente a los caprichos de un entorno rápidamente cambiante significa que es muy probable que las criaturas más pequeñas tiendan a sobrevivir a las revoluciones climáticas. En consecuencia, ellas dictan el ritmo subyacente del cambio evolutivo. La pauta para los predadores grandes se muestra en la Figura 3.18.

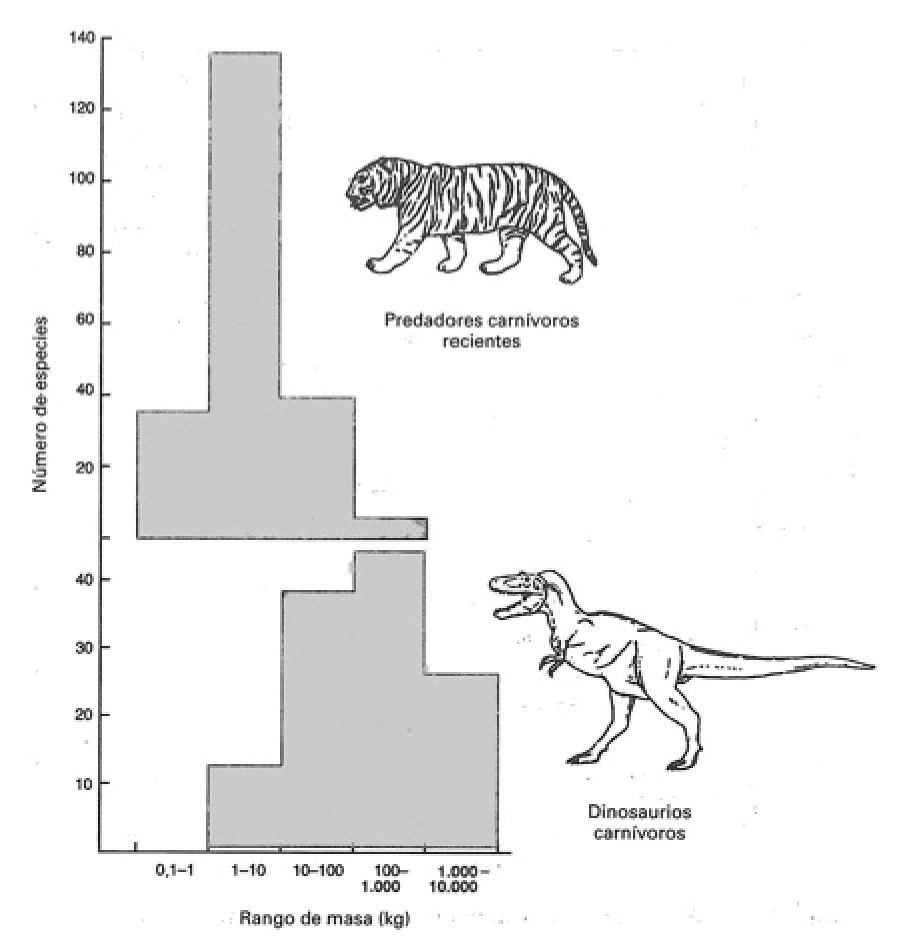


Figura 3.18. Número de grandes predadores existentes y extinguidos versus peso corporal.

Volvamos al enigma de por qué los dinosaurios grandes no fueron seguidos por mamíferos carnívoros igualmente grandes. Podríamos apelar a las presiones contrapuestas —suministros de alimento escasos y necesidad de mantener densidades de población en un nivel suficientemente alto para la reproducción— como un límite para la evolución de esos grandes mamíferos comedores de carne, y podríamos buscar alguna peculiaridad de los dinosaurios que les permitiera evitar toda la fuerza de dichos límites. ¿Tenían quizá unas recuperaciones de población mucho más rápidas y unos sistemas digestivos más eficientes que los mamíferos grandes? ¿Podían quizá los dinosaurios jóvenes comer una amplia variedad de animales pequeños e insectos grandes, lo que ampliaría su acceso a los niveles más bajos de la

cadena alimenticia? Esto les distinguiría de los carnívoros actuales, cuyas crías comen la misma dieta que sus padres. Otra posibilidad es que los dinosaurios tuvieran muchas más crías de lo que cabría esperar extrapolando a partir de lo que sabemos de los mamíferos grandes. Sabemos que el número de crías producidas en cada camada por los animales terrestres contemporáneos decrece con el tamaño del cuerpo, pero las grandes aves que anidan en el suelo no siguen esta tendencia. Los tamaños de sus polladas no varían de forma significativa con el tamaño del cuerpo. Como resultado, las aves tienen un potencial mucho mayor para el éxito reproductivo que los mamíferos de tamaño similar. ¿Podrían haber seguido la misma tendencia los dinosaurios comedores de carne? Como alternativa se ha sugerido que su metabolismo era más eficiente que el de los mamíferos, lo que les permitía hacer mejor uso de sus suministros de alimento. En algunos emplazamientos fósiles, el abanico de restos óseos encontrados en hábitats de dinosaurios sugiere que sus necesidades alimenticias pueden haber sido considerablemente menores que las de los mamíferos grandes. Aunque cualquiera de estos factores podría ser suficiente para explicar la preponderancia de dinosaurios grandes comparados con los mamíferos, también es posible que todos ellos se combinaran de maneras complicadas para vaciar las escalas, de manera que permitieran a los dinosaurios continuar su precaria existencia hasta que importantes cambios medioambientales intervinieran para eliminarlos. La cuestión está lejos de zanjarse.

De todas formas, a pesar de todos estos problemas de ser grande, el único lugar donde siempre hay espacio para la evolución de la novedad es en la parte alta del espectro de tamaños. Sólo haciéndose más grande que los animales más grandes existentes puede uno entrar en un nicho que no esté ya habitado por competidores. Si uno evoluciona hacia un tamaño más pequeño, entra en un nicho donde debe alimentarse de criaturas más pequeñas que las que le servían de alimento en el pasado. Para empeorar las

cosas, uno se enfrenta a una fuerte competencia con los que ya están adaptados a dicho nicho.

Les liaisons dangereuses. Complejidad, movilidad y evolución cultural

La mente del hombre es capaz de cualquier cosa, porque todo está en ella: todo el pasado tanto como todo el futuro.

JOSEPH CONRAD

Hemos aprendido que cuando exploramos el espectro de tamaños de los seres vivos, el número de especies que encontramos decrece conforme crece el tamaño. Pero esta disminución de la diversidad se compensa con un crecimiento en la complejidad de estas especies cuando crece su tamaño (Figura 3.19).

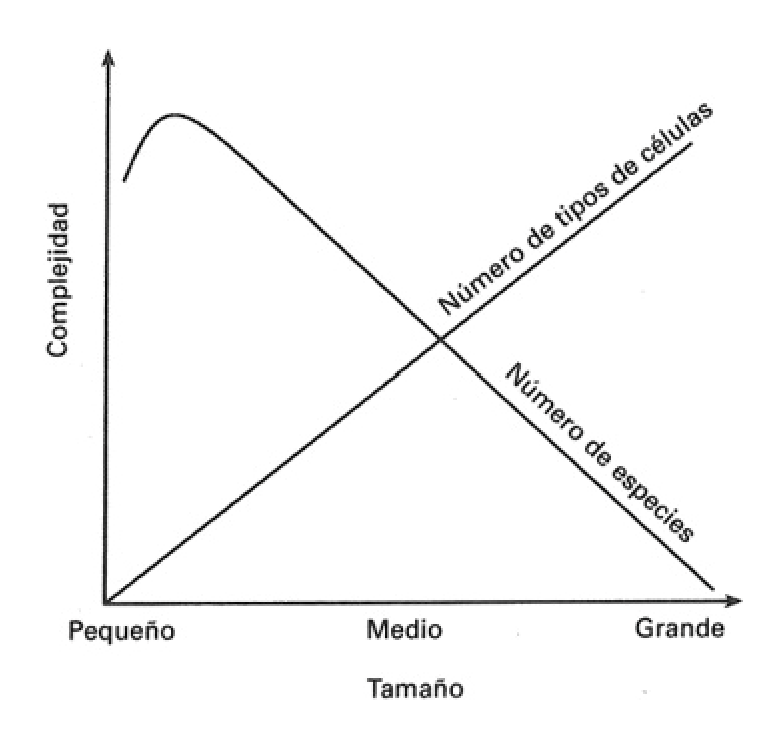


Figura 3.19. Pauta de la variación en complejidad con el tamaño de los organismos. La complejidad interna está medida por el número de tipos de células presentes en el organismo, y la complejidad externa por el número de especies diferentes.

Pasando de los pequeños organismos a los grandes, encontramos un incremento continuo en el número de tipos de células diferentes que están presentes en sus cuerpos —un reflejo de la subdivisión gradual de función que va asociada con la evolución de la complejidad organizada.

Puesto que estos diferentes tipos de células son aproximadamente del mismo tamaño, el tamaño total de un organismo está controlado por el número total de células. Uniéndose en gran número, las células evitan la competencia con otros organismos pequeños. Exploran un nicho nuevo, que a menudo ofrece la mejor estrategia para transmitir su información genética al futuro. El paso de seres vivos pequeños a seres grandes revela una gradual transferencia de diversidad desde el dominio de las apariencias externas —el abanico de especies diferentes que existen— a la constitución interna de un número menor de especies.

Esta correlación entre tamaño y complejidad sugiere que la selección evolutiva a favor de una de ellas conduce a un incremento en la otra.

No se sabe si hay un límite al número de células que podrían formar un organismo que funcione. Probablemente lo hay, aunque sólo sea por las restricciones impuestas por la necesidad de mantener el equilibrio térmico y la conectividad entre partes del organismo. Para ver por qué, consideremos el problema de construir un «cerebro» artificial y preguntémonos si hay límites a su tamaño y capacidades. Al principio, uno podría pensar que cuanto más grande sea el cerebro, mejor. Pero parémonos a pensar en lo que hacen los computadores y en lo que *nosotros* hacemos cuando pensamos en lo que *ellos hacen.* Cada paso computacional procesa información, trabaja y produce calor residual —precisamente como exige la

segunda ley de la termodinámica—. Si construimos un cerebro artificial cada vez mayor, el volumen de sus circuitos crecerá más rápidamente que el área de la superficie que lo encierra y a través de la cual puede irradiarse el calor residual. Volvemos a nuestro viejo dilema: la competición entre volumen y área. Si todo se escala simplemente en tamaño, el «cerebro» acabará por sobrecalentarse y fundirse. Para superar este problema, podríamos seguir el ejemplo del libro de la Naturaleza y dar al computador una estructura de superficie corrugada fractal, para aumentar su área con relación a su volumen[21].

Sin embargo, hay también un precio que pagar por esta estrategia. Mantener todas las partes del ordenador cerca de una superficie irregular interconectada requerirá unos circuitos de mucha mayor longitud. Esto significa que el computador operará más lentamente. Se necesitará más tiempo para coordinar señales enviadas desde una parte de la superficie a otra. Parece haber un compromiso entre aumento de volumen, potencia de computación, refrigeración de superficie y velocidad de procesamiento. ¿Hay quizá un límite final a lo grande, o lo potente, que puede ser un computador? Por ahora no lo sabemos.

Análogamente, si buscamos tamaños pequeños, hay evidentemente un número mínimo de células para que un ser vivo funcione o responda a las presiones de la solución natural. En nuestro experimento mental de construir un cerebro artificial, encontraríamos que la frecuencia de pulsación del procesador central tendría que aumentar si se contrajera el tamaño, para mantener la potencia requerida. Ahora bien, la superficie tendría que ser lo más esférica posible, o estar muy bien aislada, para minimizar las pérdidas de potencia al exterior. Con el tiempo intervendrían las tensiones impuestas por el procesador (o, más probablemente, los efectos físicos relacionados con

[21] El caso peor se presenta encerrando el volumen del «cerebro» dentro de una esfera, pues esto da la superficie de mínima área posible que podría abarcar suvemente el volumen. Es notable que en principio no hay ningún límite a lo grande que puede ser el área si la superficie es suficientemente irregular. En la práctica, la escala más pequeña de las irregularidades superficiales estaría limitada por los tamaños de los átomos (10^{-8} cm) o de sus núcleos (10^{-13} cm)

interacciones de corto alcance por otras fuerzas de la Naturaleza). Este mismo efecto limita la pequeñez de animales y aves. Sus pulsos aumentan cuando disminuye el tamaño, y cualquier ave significativamente más pequeña que los más pequeños colibríes se haría anatómicamente imposible debido al pulso enormemente rápido que sería necesario para mantener su temperatura corporal.

Cadena de noticias. Ramificación

Todas las grandes verdades son verdades obvias. Pero no todas las verdades obvias son grandes verdades.
ALDOUS HUXLEY

En años recientes ha habido un renovado interés por las formas en que muchos atributos de los organismos vivos varían con su masa, M. El enigma principal lo constituía la aparición de potencias un cuarto en las relaciones de escala. Por ejemplo, encontramos que las tasas de metabolismo celular son proporcionales a $M^{1/4}$, el tiempo de vida es proporcional a $M^{1/4}$, y la tasa metabólica del organismo entero es proporcional a $M^{3/4}$.

Hay bastante más de un centenar de «leyes» de escala observadas que tienen potencias múltiplos de 1/4. El enigma, está en que si uno hubiera tratado de predecir estas relaciones antes de ver los datos, habría esperado que la potencia ubicua fuera 1/3 en lugar de 1/4. En efecto, uno espera que estas relaciones se escalen con el tamaño, que es proporcional a $M^{1/3}$, pues la masa es igual al producto de la densidad por el volumen, y la densidad de la materia viva es constante. Es como si la Naturaleza estuviera operando realmente en un mundo tetradimensional en lugar de uno tridimensional.

Geoffrey West, James Brown y Brian Enquist propusieron por primera vez que todas estas leyes de escala podían explicarse si supusiéramos que los

organismos vivos eran redes fractales que distribuían los recursos de un modo óptimo desde su escala más grande a su escala más pequeña (dictada por el tamaño capilar, que es el mismo en todos los organismos, independientemente del tamaño), de manera que se maximice el área a través de la que pueden absorber y liberar nutrientes y se minimice el tiempo necesario para transportarlos por el organismo. La red fractal produce la eficiencia que obtendríamos añadiendo una dimensión extra al espacio. Si trazamos una línea recta en una hoja de papel, sólo cubre un camino unidimensional. Pero tracemos una línea en zigzag en toda la página y la línea unidimensional puede cubrir casi un área bidimensional entera. La línea en zigzag se comporta como si fuera una superficie. Éste es el efecto de la red fractal en los seres vivos. Esta simple consideración explica la ubicuidad de las potencias 1/4 en todas las leyes de escala biológicas.

A pesar del éxito de estas sencillas consideraciones ha habido otros que creen que las redes fractales no son una parte necesaria del argumento. Jayanth Banavar, Amos Maritan y Andrea Rinaldo argumentaron que las reglas de potencia 1/4 se siguen de un modelo más simple en el que los recursos de cualquier tipo fluyen desde una fuente hacia una variedad de puntos. Argumentan que cualquier red para distribuir nutrientes tiene una longitud de circulación L que sirve a aproximadamente a L^3 lugares donde se utilizan los nutrientes. Cualquier nutriente pasaría por L de dichos lugares en el camino hasta el punto de uso final.

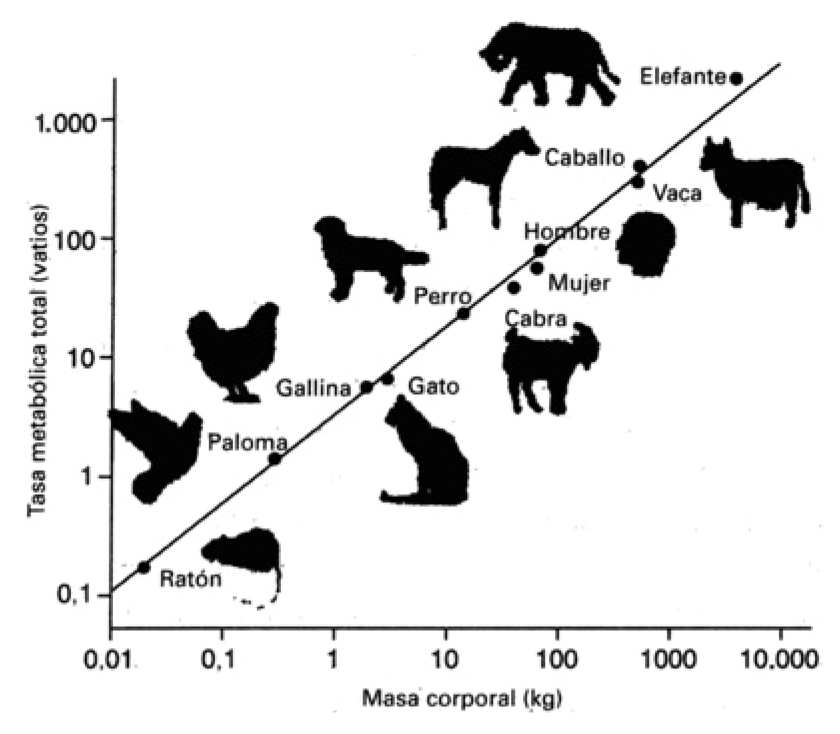


Figura 3.20. Incremento de la tasa metabólica con la potencia 3/4 de la masa corporal para una amplia gama de tamaños animales.

De modo que el total de nutrientes en el sistema en cualquier instante determinado debe estar dado aproximadamente por el número de destinos finales multiplicado por el número de paradas en el camino, que es proporcional a L^4 y no a L^3.

Por el momento, estos dos sencillos argumentos dan la misma conclusión bienvenida, pero están basados en modelos diferentes del organismo.

El modelo del flujo de recursos no necesita suponer estructura fractal, pero supone implícitamente que la red interna del organismo llena su volumen de forma tan eficiente que tiene efectivamente un volumen interno tetradimensional, exactamente igual que los fractales de West y sus colaboradores. Probablemente queda todavía un paso final que dar en este debate para clarificar la relación entre estos dos argumentos o subsumirlos en algo que sea ligeramente más general.

Los mediadores. Pasando el tiempo con el señor intermedio

La seriedad de ser importante[22].

El pequeño libro del estrés

Entre los seres vivos más pequeños y los más grandes entramos en un mundo de complejidad creciente. Conforme los organismos se hacen más complejos, se basan en formas cada vez más delicadas de enlace intermolecular y en configuraciones moleculares más complicadas. La inversión de recursos en una sola colección muy numerosa de células interrelacionadas, en lugar de en muchos organismos pequeños e independientes de unas pocas células cada uno, sería un experimento evolutivo de corta vida si los complejos grandes corrieran invariablemente un peligro mayor ante las fluctuaciones que los pequeños. Por fortuna, lo cierto es lo contrario. Una ventaja de estar compuesto de un número muy grande de componentes es que las fluctuaciones aleatorias en su distribución y funcionamiento decrecen en proporción inversa a la raíz cuadrada del número de componentes. Si el sistema es demasiado pequeño, sufrirá fluctuaciones relativamente grandes y probablemente caerá víctima de una fatal falta de fidelidad en sus programas de copia genética. Sólo si supera esta restricción tendrá la oportunidad de desarrollar formas más altas de complejidad que incluyen (como nuestros cuerpos y algunos programas informáticos) sistemas para corregir errores de copiado genético. Por supuesto, la inversión de unos recursos escasos sólo es rentable si se hace en tipos concretos de reparación y corrección de errores. Mientras que los recursos utilizados para sanar pequeños cortes y heridas están bien invertidos —evitando el riesgo de infección fatal en una edad temprana, antes de que se haya tenido descendencia— no sucede lo mismo con los repuestos que regeneran extremidades amputadas.

[22] En el original «The earnestness of being important», juego de palabras que invierte el título de la obra de Oscar Wilde «The importance of be earnest». *(N. del t.)*

Si examinamos cómo varía el tamaño cerebral de diferentes especies de criaturas vivas (no miembros diferentes de la misma especie) con sus tamaños corporales, encontramos que hay una relación directa, como se muestra en la Figura 3.21.

La pendiente exacta de la gráfica es tema de mucha discusión, que todavía tiene que dar una explicación convincente. Muestra que, aproximadamente,

$$(\text{Peso del cerebro}) \propto (\text{Peso del cuerpo})^{3/4}$$

Sin embargo, la estructura plegada del cerebro, junto con la importancia de sus conexiones con el sistema nervioso, puede significar que su peso (o su volumen) es un indicador inapropiado. Su superficie puede ser más importante. Si la inteligencia aumenta con el tamaño cerebral, entonces ambos parecen ser rasgos evolutivos únicos. Aunque han existido animales más grandes, más rápidos y más fuertes en el pasado, ninguno ha sido tan inteligente como algunos de los que viven hoy. Un examen detallado de cómo varía el tamaño del cerebro con el tamaño del cuerpo muestra un espectro prácticamente continuo de incremento para criaturas terrestres hasta un cierto tamaño grande; luego hay un espacio vacío, tras el cual sólo está el *Homo sapiens.* Parece que no hay ejemplos intermedios. Quizá fueron eliminados pronto por las tendencias agresivas del *Homo sapiens.* Sabemos que hubo en otro tiempo otras especies inteligentes, como el hombre de Neanderthal y el hombre de Cro-Magnon, pero las heridas que se encuentran en muchos de sus esqueletos fósiles sugieren que pueden haber sido eliminados en conflictos con el *Homo sapiens.* Por el contrario, si examinamos el espectro de la vida marina, estos espacios vacíos no aparecen. La vida en el mar parece mucho menos competitiva. Hay menos presión por los recursos alimenticios y el territorio. Pero si hay tan poca presión en el medio ambiente marino, ¿por qué no aumenta drásticamente la población del mar?

Quizá hacerse grande es la única forma en la que es posible que el cerebro se haga grande, y con ello que aumente la inteligencia. Algunos biólogos, como Stephen Jay Gould, han argumentado que una capacidad tan específica como el lenguaje podría ser simplemente un subproducto del tamaño cerebral aumentado. Pero éste parece un argumento extraño. Aumentar el tamaño cerebral es un camino evolutivo arriesgado y costoso. Sólo sería rentable si ofreciera algunas ventajas espectaculares. El lenguaje es la más admirable de tales ventajas. Es mucho más probable que la evolución de un cerebro grande fuera un subproducto de la selección natural en favor de una capacidad lingüística ampliada (quizá por selección sexual, porque los individuos locuaces son más interesantes y con ello atractivos, como ha sugerido Geoff Miller) que viceversa.

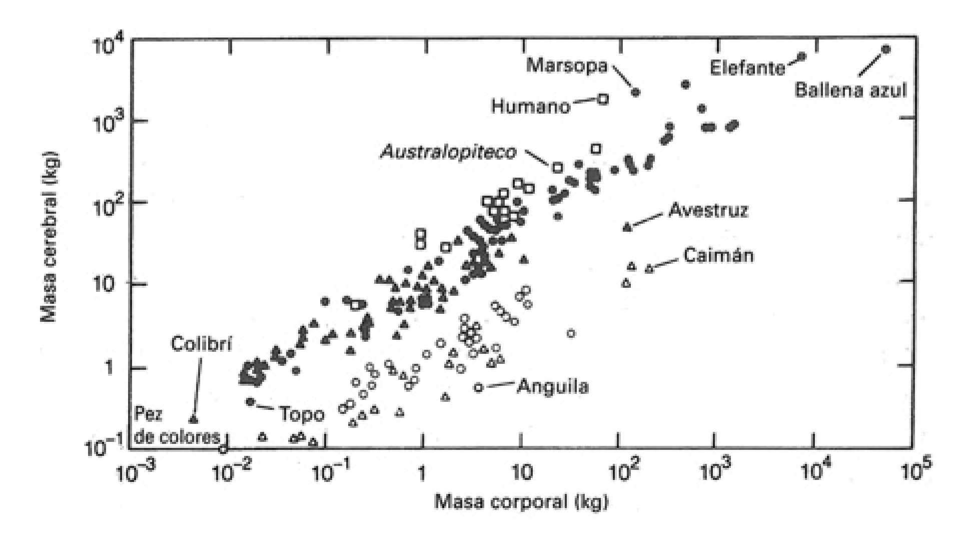


Figura 3.21. Variación en el peso del cerebro con el peso corporal.

Si simplemente duplicamos el tamaño de un cerebro, sin cambiar la naturaleza de las conexiones neurales, la duplicación de tamaño no supondría una duplicación de capacidades. Los animales grandes tenderán a tener cerebros más grandes que los animales pequeños debido a la escala global de su ingeniería corporal. Para dar cuenta de esto, reexaminemos la relación entre tamaño del cerebro y tamaño del cuerpo, pero eliminemos el

aumento del tamaño del cerebro que se debe solamente al crecimiento del tamaño corporal. Lo que queda se denomina cociente de encefalización, EQ (definido como el tamaño del cerebro del mamífero en cuestión dividido por el tamaño medio del cerebro de todos los mamíferos con el mismo tamaño corporal): indica si el tamaño del cerebro supera el nivel esperable de un tamaño corporal dado. Como cabría esperar, los seres humanos están enormemente superdotados con materia gris cuando se ven de esta manera. Nuestros rivales más próximos, los delfines y las marsopas, son bastante enigmáticos. En general, podemos entender cómo tienen que aumentar la complejidad y la inteligencia —y con ello el EQ— con el tamaño. Nuestra discusión de la termodinámica de la cadena alimenticia mostraba lo difícil que se hace la vida para los predadores grandes. No sólo se hacen más escasas las calorías sino que las presas con que se alimentan se hacen consecuentemente más raras, más fieras y más ágiles cuando se hacen más grandes. Un predador grande debe dedicar cada vez más recursos a programar un sofisticado sistema de orientación que le permita cazar eficientemente presas móviles. Somos lo que comemos. En el caso de los delfines es difícil ver para qué sirven sus grandes cerebros. Tienen recursos alimenticios abundantes, que son fáciles de atrapar, y no parecen estar excesivamente amenazados por predadores, pues es muy baja la población de grandes criaturas marinas. ¿Quizá tiene esto algo que ver con su sistema de guía sónico? Recientemente se ha visto que los delfines muestran un comportamiento agresivo hacia las marsopas más pequeñas que quizá han estado haciendo demasiado ruido para que el sonar de los delfines funcione adecuadamente.

Si volvemos al enigma del tamaño aumentado de nuestro propio cerebro, es claro que un aumento en el tamaño del cuerpo no es suficiente para explicarlo. Tampoco es realmente necesario. La introducción de unos pocos genes ventajosos que prolonguen la porción de juventud durante la que crece el cerebro puede dar a una especie un cerebro anormalmente grande

en relación con su tamaño corporal. Y, de hecho, éste parece ser el caso si se compara el crecimiento humano con, digamos, el de nuestros más cercanos parientes genéticos, los chimpancés.

El beneficio de la evolución de la complejidad del cerebro humano ha sido la posibilidad de desarrollo, adaptación y evitación de competencia por medios no genéticos. Transmitiendo ideas por interacción social, mediante el lenguaje, los registros, las imágenes, símbolos, gestos y sonidos, nuestro desarrollo ha avanzado mucho más rápidamente que codificando tipos concretos de información en genes. La información que puede transmitirse por estos medios conductuales y culturales es de un tipo que no puede transferirse por herencia genética. Posibilita la acumulación del aprendizaje, la enseñanza y el conocimiento. Mientras que la transferencia de información por medios genéticos está limitada a la herencia que recibe la progenie de un individuo, no hay límite para el alcance potencial de la influencia de las ideas y la cultura. Las adaptaciones favorables pueden difundirse muy rápidamente a través de la población. Una idea, como hacer ejercicio físico o evitar productos alimenticios insanos, que visiblemente aumenta la probabilidad de supervivencia, puede convertirse en una posesión común casi de la noche a la mañana, una vez propagada por los medios de comunicación. La transmisión cultural permite que pueda transmitirse rápidamente información sobre el entorno natural, y es esencial para la supervivencia en un entorno que cambia más rápidamente que el intervalo de tiempo entre generaciones sucesivas.

En el capítulo anterior vimos algo de la potencia explicativa de la selección natural. Donde quiera que encontramos intrincadas complejidades entretejidas, hallamos la mano del tiempo, modelando adaptaciones lentamente. En este capítulo hemos visto que factores comunes a todos los organismos ponen restricciones a su desarrollo que limitan las variaciones sobre las que la selección natural es libre de actuar. El tamaño es una influencia siempre presente que determina aspectos de la estructura de un

organismo y la estrategia para la supervivencia; está ligado al hábitat y al hábito, al estilo de vida y a la calidad de vida.

Pese a los impresionantes logros de los últimos cuatro mil años de la historia humana, este período es un interludio relativamente breve en el curso de la existencia humana. El enorme número de generaciones que los humanos pasaron cazando y recolectando podría así tener las claves del origen de nuestros comportamientos, gustos y antipatías instintivos. Examinando el medio ambiente primitivo en el que vivían y evolucionaban los humanos durante tan enormes períodos de tiempo, deberíamos encontrar claves para la selección del comportamiento adaptativo y la eliminación del comportamiento maladaptativo, que ha dejado una impronta que aún llevamos hoy. Aunque hemos advertido contra la creencia de que todas las adaptaciones son perfectas o que todos los rasgos están optimizados, algunas capacidades mentales humanas pueden ser resultado de adaptaciones a circunstancias primitivas. Es probable que los enormes períodos de tiempo durante los que nuestros ancestros eran buscadores y cazadores-recolectores en el Pleistoceno, entre hace dos millones y diez mil años, hayan sido formativos para nuestra especie (véase la Figura 3.22).

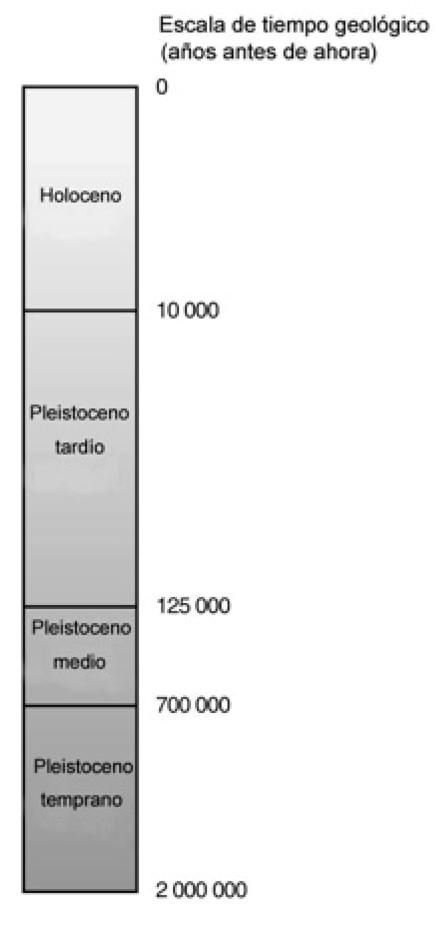


Figura 3.22. Escala de tiempo para el Cuaternario, los últimos dos millones de años de tiempo geológico.

Aunque hace tiempo que se ha puesto de moda considerar cada mente humana como una tabla rasa que es informada por aprendizaje sólo después de su nacimiento, esta visión se ha mostrado lamentablemente inadecuada para explicar el desarrollo del lenguaje humano (véanse pp. 50-55). La preprogramación genética por selección natural nos dota con capacidades lingüísticas. Quienes estaban en posesión de tales capacidades, incluso en una forma primitiva, tenían una clara ventaja para la supervivencia sobre los que no la tenían: la capacidad lingüística es adaptativa. Cuando quiera que encontremos características y conductas humanas ampliamente compartidas —especialmente las de gran complejidad— debemos buscar una posible explicación adaptativa. En la práctica, son las *diferencias* en comportamiento

entre una persona, o grupo, y otra las que parecen más fácilmente atribuibles al aprendizaje.

Nuestros ancestros homínidos del Pleistoceno vivían principalmente en climas tropicales con condiciones ambientales muy características. Las horas de luz diurna variaban poco a lo largo del año e igualaban aproximadamente a las de oscuridad. Había muy poca variación estacional en temperatura. La poca que había sería despreciable comparada con las variaciones de temperatura diurna; éstas podrían ser considerables porque una ausencia de cubierta de nubes permite un enfriamiento radiativo muy rápido. En esas latitudes tropicales los vientos eran también suaves y los factores de enfriamiento eran despreciables, pero había altas exposiciones a la radiación ultravioleta y un riesgo de deshidratación. Las altas temperaturas diurnas aseguraban que la clave para la supervivencia estaba en la pluviosidad —y, más críticamente, en los niveles pluviométricos *más bajos* durante las estaciones secas—. La pluviosidad es muy variable en climas tropicales, con largas estaciones secas seguidas de diluvios torrenciales. La longitud de estas estaciones secas es el factor más influyente para determinar la diversidad de vegetación. Cuando se considera en combinación con la pluviosidad anual media, nos ayuda a crear una imagen de cómo surgen los diferentes hábitats (véase la Figura 3.23). Conforme se alargan las estaciones secas, la vegetación se hace más simple y más pobre. Estas variaciones influyen también en el espectro de los seres vivos que viven de ello, el tiempo que deben dedicar a buscar alimento, y con ello en las pautas de comportamiento que adoptan.

Nuestra propia fisiología muestra vestigios de una primitiva adaptación a ambientes tropicales. Tenemos una tasa de sudoración mayor y un vello corporal mucho menor que otros mamíferos. Estas características ayudan a regular muy eficientemente nuestra temperatura corporal, incluso cuando participamos en actividades de caza que producen considerable estrés térmico y pérdidas de agua. Aquí, nuestro tamaño empieza a desempeñar un papel. Los animales pequeños necesitan comer una fracción mucho mayor de

su peso corporal para satisfacer sus necesidades energéticas diarias. Deben elegir alimentos con valores caloríficos muy altos o, de lo contrario, pasan la mayor parte de su vida alimentándose. Por consiguiente, deben encontrar suministros de alimento fiables y duraderos, hibernar o inventar maneras de almacenar alimentos para los tiempos duros. Los animales grandes no están tan limitados. Son más móviles y pueden mantenerse con recursos más desiguales. La bipedestación ayuda a la movilidad y dota a los humanos con una notable resistencia a las grandes distancias y flexibilidad de movimiento en terrenos muy diferentes. Si hay presión evolutiva para desechar la búsqueda incesante de recursos impredecibles, entonces habrá ventaja adaptativa en la movilidad y el tamaño grande. Hay penalizaciones para la evolución en esta dirección, que deben ser compensadas con creces por estas ventajas. Con tamaño y peso aumentado, la tierra es un ambiente más seguro que los árboles.

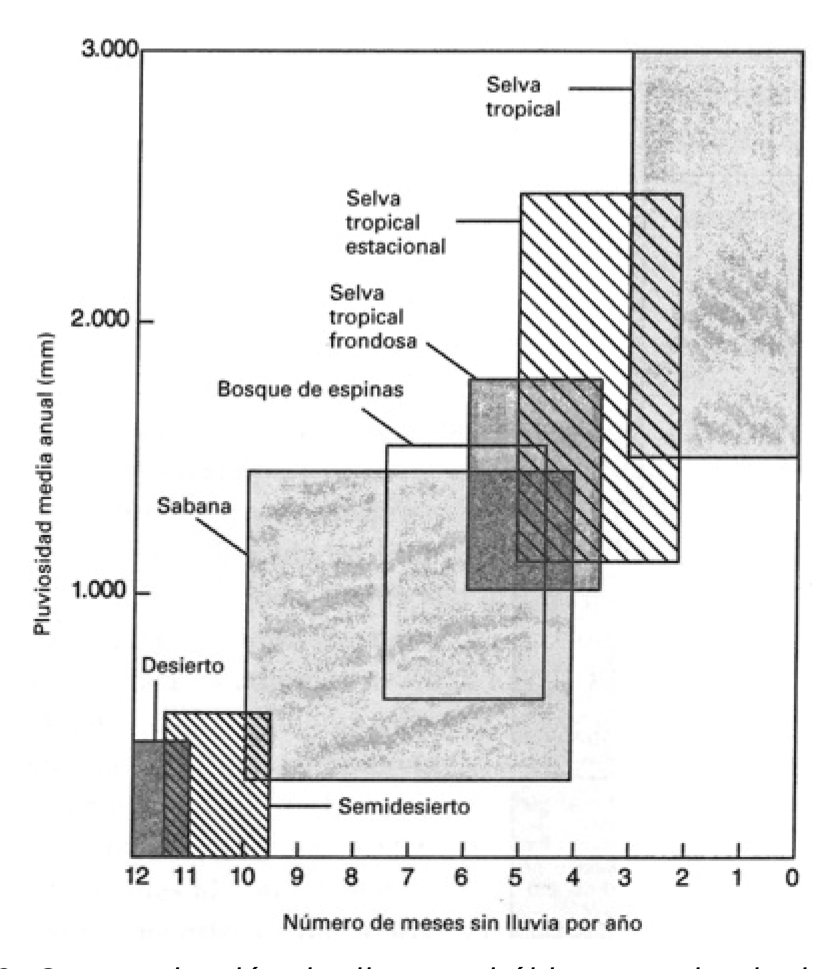


Figura 3.23. Caracterización de diversos hábitats por la pluviosidad anual media y la longitud de la estación seca.

El ambiente en el que parece haber tenido lugar el desarrollo de los homínidos terrestres más grandes era el de las sabanas abiertas, con sólo una esporádica cubierta arbórea. Como vimos en la Figura 3.23, éste es un ambiente con pluviosidad limitada pero altamente variable. La supervivencia requiere adaptación a los problemas que plantea un entorno semejante. La pobreza de la vegetación en la estación más seca requiere búsquedas de alimentos mucho más diversas, y probablemente conduce a la introducción de carne en la dieta. La caza es una actividad desafiante, que selecciona mejores capacidades cooperativas y una inteligencia más alta. También estimula la interacción social. Además de la necesidad de cazar presas grandes y peligrosas, existe también la posibilidad de compartir las grandes

cantidades de alimento no almacenable que cada matanza proporciona. El grano y las bayas pueden conservarse; la carne no. Comer carne es una fuente de sustento mucho menos especializada que las plantas y las bayas. Hay muchos y variados vegetales y frutas (parte de los cuales son incomestibles o venenosos), pero poca variación en las formas de carne. En consecuencia, las criaturas herbívoras manifiestan una correspondiente diversidad, que supera con mucho a la de los carnívoros. En contraste, la necesidad de moverse y explotar fuentes de alimento impredecibles en un clima cambiante anima a la caza en gran escala. Esto hace al cazador hábil para utilizar recursos de muchos nichos ambientales, cada uno de los cuales puede estar ocupado por especies locales especializadas pero relativamente inmóviles. Los cazadores pueden sacar relativamente poco de cada nicho en comparación con su predador principal, pero el beneficio total hará de esta ecléctica explotación de recursos una estrategia muy ventajosa. La caza diversa, la movilidad y una población dispersa están estrechamente unidas. Hoy, estamos muy impresionados por la gran concentración de personas en áreas concretas de la Tierra, y obtenemos grandes beneficios aumentando las densidades de población locales. Pero esto difícilmente sucedía en el pasado lejano. Cuando los recursos globales son muy grandes y los niveles de población bajos, compensa dispersarse y encontrar una fuente de alimento que no esté siendo explotada por otros, antes que aumentar la demanda de recursos locales limitados.

Uno de los correlatos más intrigantes con el tamaño de un organismo es su vida media. Un organismo grande, especialmente uno con un gran cerebro, es una inversión evolutiva considerable. Hacerse grande es una estrategia que se extinguirá si los organismos grandes no viven mucho tiempo y utilizan su longevidad con algún propósito que amplíe la fecundidad y la supervivencia.

Gracias a su longevidad, una criatura grande podría maximizar su producto reproductivo. Pero el número de descendientes de los animales grandes

suele ser muy bajo, y el tiempo de gestación y el período entre nacimientos es grande. En consecuencia, las criaturas grandes dedican mucho más cuidado a sus crías que las más pequeñas y más efímeras, y sus tasas de mortalidad son menores. Las criaturas grandes han sacrificado la eficacia reproductiva a los intereses de una mayor eficacia en el uso de recursos alimenticios. Estas estrategias requieren estructuras sociales particulares. La longevidad requiere que las criaturas interactúen con miembros de su propia especie durante largos intervalos de tiempo. Largos períodos de cría ayudan también a crear una pauta compleja de comportamiento social que hace ventajoso el comportamiento altruista. Estas interdependencias se entretejen para producir una red de consecuencias que derivan de un tamaño aumentado (véase la Figura 3.24). Las ventajas que presentan son considerables y pueden haber desempeñado un papel vital en la rápida evolución de capacidades humanas durante sus etapas primitivas.

Los rivales. La evolución de la cooperación

Un amigo en una vida es mucho, dos son demasiados, tres apenas son posibles. La amistad necesita cierto paralelismo de vida, una comunidad de pensamiento, una rivalidad de objetivos.

HENRY BROOKS ADAMS

La selección natural pone a prueba y criba las estrategias para las interacciones sociales entre individuos. Muestra que ciertas «estrategias» de interacción o de organización social conducirán a mayores beneficios que otras. Si se adoptan, deben ser resistentes a la invasión por individuos y grupos que adopten variantes de ellas. De este modo es posible que surjan espontáneamente pautas ordenadas y concretas de comportamiento social.

Como veremos, la interacción social repetida con muchos individuos desempeña un papel clave en la emergencia espontánea de estructuras sociales estables. Deberíamos resaltar que aunque aquí se emplea la palabra «estrategia», ello no implica necesariamente que las acciones tengan un propósito consciente (aunque podrían tenerlo). Es simplemente un término para describir una pauta de comportamiento empleada frente a los competidores, ya sean conocidos o desconocidos. Un organismo no necesita «saber» conscientemente por qué una pauta de comportamiento es más ventajosa que otra. Una estrategia sólo tiene que tener mejores resultados que las estrategias alternativas para que sea seleccionada a largo plazo, porque sus usuarios sobrevivirán con más frecuencia. Uno de los resultados más interesantes de dicha aproximación es una comprensión de cómo puede surgir el altruismo recíproco. Los comportamientos cooperativos que ofrecen beneficios mutuos —yo te ayudo a reparar tu automóvil a cambio de que tú me ayudes a arreglar mi tejado— pueden mejorar a ambas partes, incluso si pueden incurrir en costes por acciones que no les benefician directamente.

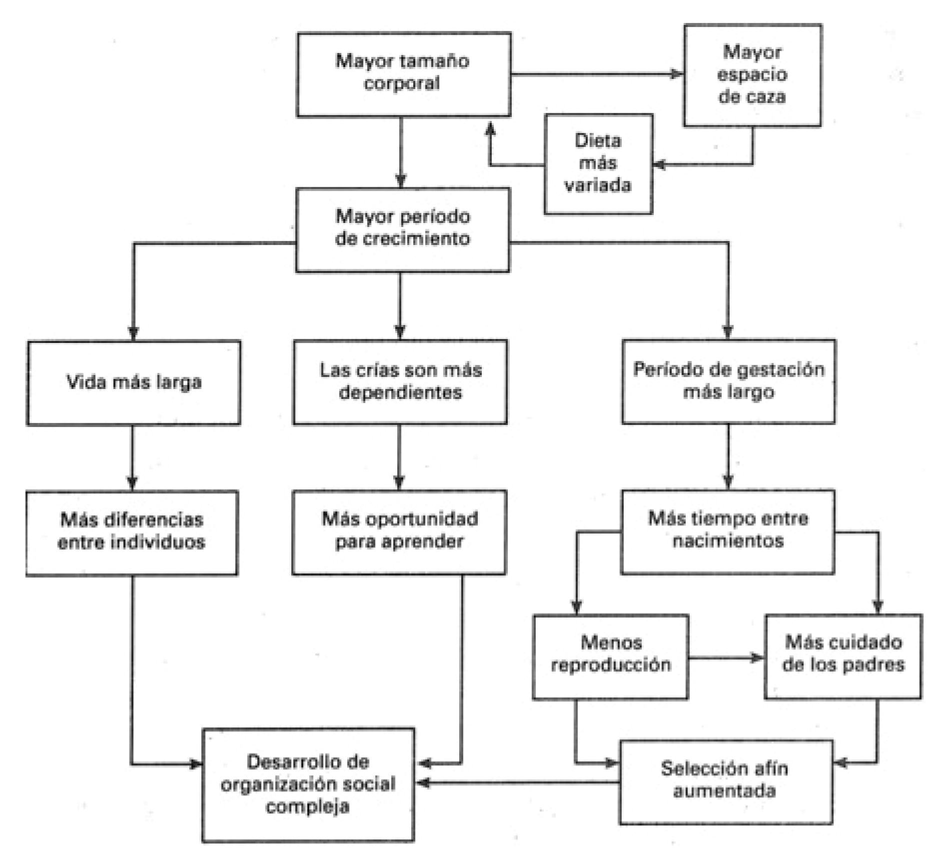


Figura 3.24. Cadena de consecuencias que surgen de aumentos evolutivos en el tamaño corporal.

Las ventajas y errores de la cooperación se ilustran con el clásico problema del Dilema del prisionero. Dos prisioneros están en celdas separadas y no pueden comunicarse. Sus guardianes los presionan para que confiesen, diciendo a cada uno de ellos que si él confiesa y su compañero no lo hace, entonces él quedará libre, mientras que el otro será castigado a la máxima pena de cinco años de prisión. Si ambos confiesan, la confesión de cada uno de ellos será menos valiosa, de modo que ambos serán condenados a tres años. Si ninguno de ellos confiesa, entonces ambos serán convictos de un crimen menor e irán a prisión durante sólo un año. ¿Qué estrategia debería adoptar cada prisionero?

Consideremos la posición del prisionero A. Si su colega, el prisionero B, confiesa, entonces A también debería confesar, puesto que de lo contrario le

caerían cinco años en lugar de tres. Por otra parte, si B no confiesa, entonces a A le interesa confesar porque entonces quedaría libre. Así pues, sea lo que sea lo que hace B, a A le interesa confesar. Puesto que el mismo razonamiento se aplica a B, concluimos que la mejor estrategia a adoptar por cada uno de ellos es la confesión. Pero esta confesión conjunta da como resultado que ambos reciban tres años de condena, en lugar del año que habría recibido cada uno si se hubiera mantenido en silencio. Sin embargo, sería contrario al interés de cada uno mantenerse silencioso, incluso sabiendo que a ambos les iría mejor si ninguno de ellos confesara. Éste es el Dilema del prisionero; en esencia, es un dilema al que se enfrenta todo individuo que mantiene interacciones y contratos sociales con otros individuos. En efecto, siempre es en autointerés de un individuo obtener algo por nada; siempre parece ser en interés de un individuo hacer trampa a otro, incluso cuando ambos estarían mejor si ninguno de ellos hiciera trampa. Esto parece un argumento a favor de que el altruismo y la cooperación no pueden evolucionar espontáneamente en un grupo de individuos, cada uno de los cuales persigue su propio interés. Tendría que haber un dictador —real o imaginario— para imponer pautas de comportamiento cooperativo a los miembros del grupo. Sin embargo, el razonamiento olvida incluir los efectos de la interacción repetida entre individuos en una comunidad. Ésta es una consecuencia de la complejidad social que puede hacer ventajosa la cooperación.

Consideremos una secuencia de interacciones (llamadas «juegos») del Dilema del prisionero que implica a dos personas. Las ganancias del jugador A y del jugador B según adopten políticas de cooperación o no cooperación se especifican en la tabla adjunta que describe las cuatro situaciones.

JUGADOR B	JUGADOR A: Coopera	JUGADOR A: No coopera
Coopera	A y B obtienen R	A obtiene S B obtiene Y
No coopera	A obtiene Y B obtiene S	A y B obtienen P

Para concretar, escojamos R= 3, P = 1, S = 0 y T = 5. Entonces, como hemos visto, no cooperar va en interés racional de ambos jugadores, incluso si ello significa que obtendrán una ganancia 1 en lugar de la ganancia 3 que habrían obtenido si hubieran cooperado. En general, el Dilema del prisionero aparece en situaciones donde las ganancias para pares de estrategias obedecen a las desigualdades

$$T > R > P > S \text{ y } R > (T + S)/2$$

si ambos jugadores seleccionan su estrategia antes de saber qué estrategia ha escogido el otro. Pero supongamos que este juego se juega muchas veces en una gran comunidad de jugadores, sumándose las ganancias totales en todos los juegos. En este caso, hay un factor de depreciación a considerar. El valor real de una ganancia potencial en el futuro no es tan grande como el de una ganancia ahora, pues el juego podría detenerse por alguna razón antes de que se obtuviera la ganancia —el jugador podría morir o su banca podría venirse abajo—. Por consiguiente, la ganancia de cada juego se reduce respecto a la anterior por un factor de descuento, d, donde $0 < d < 1$. La ganancia esperada de un gran número de juegos se obtiene sumando las ganancias esperadas de cada juego, donde la ganancia de cada juego se calcula multiplicando la ganancia del juego inmediatamente anterior por el factor de descuento, d. Por ejemplo, si el número de juegos sucesivos es muy grande, de modo que podamos tratarlo como si fuera infinito, la

ganancia acumulativa esperada para ambos jugadores si cooperan en todos los juegos se aproxima mucho a la suma[23]

$$R + Rd + Rd^2 + \ldots = R/(1 - d)$$

Así, la cooperación se convierte en una posible estrategia racional que es mutuamente beneficiosa, porque aunque un jugador dado no sabe la elección de otro en el juego actual, sabe lo que el otro eligió en los juegos anteriores. Puede escoger su estrategia para el *n*-ésimo juego de acuerdo con las elecciones que ha hecho su oponente en los (n – 1) juegos anteriores.

El parámetro de descuento, *d,* mide la importancia del futuro. Sólo si *d* es suficientemente próximo a 1 (es decir, sólo si el valor presente de la ganancia futura es suficientemente alto) es posible que una estrategia «amistosa», en la que el jugador coopera hasta que el otro jugador no coopera, sea una estrategia colectiva estable; es decir, una estrategia que, si fuera adoptada por todos, no podría ser mejorada por alguien que adoptase una estrategia diferente. Para que una estrategia persista en la Naturaleza debe ser colectivamente estable, pues siempre aparecerán individuos que ensayarán estrategias diferentes. Sin embargo, una población de no cooperantes será invadida con éxito por grupos de cooperantes si *d* es suficientemente grande y si la frecuencia relativa con la que los cooperantes interaccionan entre sí, antes que con los no cooperantes, es suficientemente alta. Por ejemplo, si escogemos T = 5, R = 3, P = 1, S = 0 y *d* = 0,9, entonces un grupo de individuos que utilice una estrategia «amistosa» de «cooperar hasta que el otro no lo haga, luego no cooperar durante un juego, y luego cooperar hasta que el otro deje de cooperar de nuevo» puede invadir con éxito una población de no cooperantes si sólo el 5 por 100 de sus

[23] Esta suma es una progresión geométrica infinita. Para comprobarlo, basta multiplicar por (1 – *d*) los términos en ambos miembros de la ecuación; el miembro derecho es claramente *R,* mientras que el izquierdo da una sucesión de términos que se cancelan mutuamente, positivo con negativo, dejando sólo *R.*

interacciones son con los que no adoptan esta estrategia. Por el contrario, los cooperantes individuales no pueden invadir con éxito a una población de no cooperantes porque la estrategia de total no cooperación también es colectivamente estable. Sin embargo, un grupo de no cooperantes no puede invadir con éxito a una población de cooperantes que utilicen cualquier estrategia colectivamente estable.

En general, un patrón de respuesta que incorpore una estrategia cooperativa puede invadir a una población de no cooperantes si, y sólo si, conduce a cooperación con otros cooperantes y excluye (o penaliza) a los no cooperantes. Cualquier patrón de comportamiento que viole esta regla terminará siendo descartado. Hay muchos patrones de decisión que siguen esta prescripción, y cualquiera de ellos podría en principio haber sido seleccionado durante enormes períodos de la primitiva historia humana. Se puede ver que, aunque es importante ser capaz de detectar no cooperantes incondicionales (tramposos), no hay necesidad de tener habilidad para detectar cooperantes incondicionales (altruistas) —porque pocos sobrevivirán a largo plazo—. Los altruistas siempre pueden aparecer debido a deriva genética, o mantenerse por decisión consciente, o por las acciones de un «dictador» en la comunidad.

Cuando se trata de examinar interacciones sociales concretas en tiempos antiguos, es necesario evitar el asignar valores contemporáneos de costes y beneficios, en lugar de los apropiados para una economía primitiva de cazadores-recolectores. Hemos heredado un gusto por el azúcar y los alimentos grasos —un hecho que la industria alimenticia y sus agencias publicitarias explotan sin reparos—. Nuestro gusto instintivo por tales alimentos es probablemente un remanente del enorme beneficio calórico de estos recursos escasos para los primeros cazadores-recolectores. Ahora estimamos de manera diferente su valor alimenticio. Es poco probable que poseamos respuestas adaptativas importantes a los productos agrícolas, puesto que la agricultura ha sido una actividad humana durante poco más de

diez mil años, comparados con los dos millones de años de caza y búsqueda de comida.

El análisis de las pautas de comportamiento óptimas podría aplicarse al hecho de compartir comida, al intercambio de servicios, el cuidado de los jóvenes, la caza en nombre de los demás y así sucesivamente. También nos lleva a esperar que las tácticas de trueque, y de juegos de estrategia, sean actividades para las que los seres humanos poseen afinidad transcultural. Muestran cómo la interacción social —en particular la interacción social repetida que deriva de la longevidad y el gran tamaño en circunstancias en las que la individuación no da ganancias— tiene consecuencias inesperadas para la evolución de pautas de comportamiento que a primera vista parecen ir en contra de las expectativas de la selección natural. Deberíamos resaltar, no obstante, que el hecho de que ciertas pautas de comportamiento sean óptimas de esta manera no las hace «buenas» o «deseables»; una prescripción ética basada en estrategias evolutivamente estables no tiene un estatus especial y muy bien podríamos decidir rechazarla por otras razones.

Si entráramos en contacto con una civilización extraterrestre, esperaríamos que evolucionara a partir de pautas de comportamiento social que fueron en otro tiempo seleccionadas «naturalmente» con preferencia a otras. No debería sorprendernos, en circunstancias adecuadas, encontrar comportamiento cooperativo y altruista—independientemente de la existencia de creencias trascendentales en la existencia de cánones absolutos de comportamiento bueno y malo que encontramos en la raíz de casi todos los sistemas de creencias religiosas—. Podríamos añadir que tales creencias no están necesariamente socavadas por el hecho de que coincidan con patrones de comportamiento que son óptimos para el bien de los individuos en un análisis coste-beneficio. Incluso se podrían incorporar las ganancias de creencias religiosas correctas o erróneas en el análisis global de ganancias y estrategias. El primero en hacerlo, aunque de forma limitada, fue el filósofo francés Blaise Pascal. En sus *Pensées,* reunidos a finales del

siglo XVII y publicados póstumamente, expuso muchos argumentos en apoyo de la creencia religiosa cristiana. Uno de ellos muestra el primer ejemplo de un juego de estrategia. Consideraba a alguien que está pensando en hacer una apuesta de la que depende su destino futuro. Partiendo de la hipótesis agnóstica de que «si hay un Dios... somos incapaces de saber lo que Él es, o si Él es» y «la razón no puede establecer nada aquí... es un juego abierto», Pascal argumentaba que la respuesta lógica de una persona prudente ante su ignorancia es apostar su vida a la «existencia» de Dios[24]. Si uno lo hace, entonces hay dos posibles resultados. Si Dios existe, entonces la creencia trae una recompensa infinita, y la no creencia una pérdida infinita; mientras que si Dios no existe, entonces la creencia infundada no cuesta nada en el mejor de los casos, y en el peor sólo una pérdida finita de tiempo y esfuerzo. Sobre esta base, la conclusión de Pascal es que el agnóstico debería apostar por la existencia de Dios.

Es importante reconocer que este tipo de altruismo de «gen egoísta» no es exactamente lo que parece. Aunque los biólogos sugieren a menudo que esto sienta una base para entender el altruismo humano y el valor que le damos, queda corto en muchos aspectos. Es altruismo sin un motivo altruista. De hecho, es exactamente lo contrario: altruismo con un motivo egoísta. Es la idea que hay detrás de la actividad altruista recíproca de la variedad «yo te rasco la espalda y tú me las rascas a mí». En la práctica hemos llegado a admirar el altruismo que va mucho más allá que el que se requiere simplemente para maximizar la ganancia en un problema de teoría de juegos. Las preguntas interesantes a responder por antropólogos y éticos es por qué lo hacemos y por qué los individuos actúan en ocasiones de maneras que no van en su interés común y ni siquiera en el de otros individuos que comparten sus genes. Curiosamente, reconocemos que, como admiten Edward O. Wilson y Michael Ruse, «los seres humanos funcionan mejor si sus

[24] *Pensées,* n.º 223.

genes les hacen creer que existe una moralidad objetiva desinteresada que les une y a la que todos deberían obedecer».

El jardín secreto. El arte del paisaje

Roca de los tiempos, ábrete a mí, ocúltame en Ti.
AUGUSTUS TOPLADY

El hecho de que nuestros ancestros pasaran períodos muy largos en hábitats de sabana tropical nos lleva a esperar que algunas de nuestras respuestas emocionales a un entorno semejante pueden tener características adaptativas. Las reacciones estéticas instintivas ante el mundo no podrían haber evolucionado si, en promedio, contribuyeran negativamente a la supervivencia. Por el contrario, las respuestas que amplían las posibilidades de supervivencia persistirán. Por esto es por lo que la carne podrida nos sabe desagradable, mientras que el azúcar es dulce. Algunas de las respuestas desarrolladas más interesantes son las asociadas con nuestras respuestas al entorno. Nos proporcionan claves importantes para la fuente de nuestras más básicas preferencias estéticas.

La relativa longevidad de los humanos primitivos hacía que necesitaran varios hábitats para mantener un suministro de recursos duradero. Su movilidad les permitía satisfacer esa necesidad. De hecho, los estudios muestran que los cazadores-recolectores primitivos se desplazaban con frecuencia. La movilidad de los seres humanos asegura que tendrán que tomar decisiones sobre el mejor entorno; los criterios utilizados para tomar esas decisiones serán impuestos por selección natural durante períodos de tiempo muy largos. Los organismos pequeños que son de corta vida, están fijos en el espacio, se mueven erráticamente llevados por vientos y corrientes de agua, o están limitados en su abanico de búsqueda de alimento, no se enfrentan al problema de la elección de ambiente.

Como se ha mencionado, el hábitat en el que se originaron los seres humanos era el de la sabana tropical africana. Por consiguiente, es posible que hayamos desarrollado preferencias por ambientes con muchas de las características y aspectos favorables a la vida que ofrecía este hábitat durante la época del Pleistoceno. Esperamos que las propensiones generadas por la adaptación nos predispondrían a identificar buenos hábitats —tanto con respecto a su estado actual como al estado esperado en el futuro—. Estos tendrán interesantes subproductos estéticos porque nuestros ancestros no tenían acceso directo a ninguna medida infalible de la seguridad, o de la fertilidad, de un ambiente particular. No tomaban muestras del suelo ni controlaban los niveles de criminalidad. Todo lo que podían hacer era examinar varios indicadores correlacionados con la adecuación del entorno en su experiencia —experiencia que valoraba la seguridad y la supervivencia—. Análogamente, cuando las aves exploran los potenciales lugares de anidada en los bosques, necesitan ser sensibles a una variedad de factores concernientes a la seguridad y la disponibilidad de alimento, pero los ornitólogos han descubierto que ellas toman sus decisiones de anidar en un lugar concreto sobre la base de la abundancia y las pautas de ramificación en los árboles. De un modo similar, es probable que algunas elecciones humanas de hábitats apropiados se tomaran en respuesta a ejemplos fácilmente accesibles. Este es un estado de cosas que puede llevar a respuestas oportunas cuando el atributo primario no está presente. Así, la aparición de nubes en el horizonte es una señal bienvenida en una pradera polvorienta. Su aparición está fuertemente correlacionada con la lluvia y una abundancia local de alimento, incluso cuando se tiene agua corriente en abundancia, una disposición a encontrar agradables los patrones de nubes quedaría como una adaptación heredada, que en otro tiempo tuvo una ventaja de supervivencia positiva frente a una actitud desinteresada hacia el cielo.

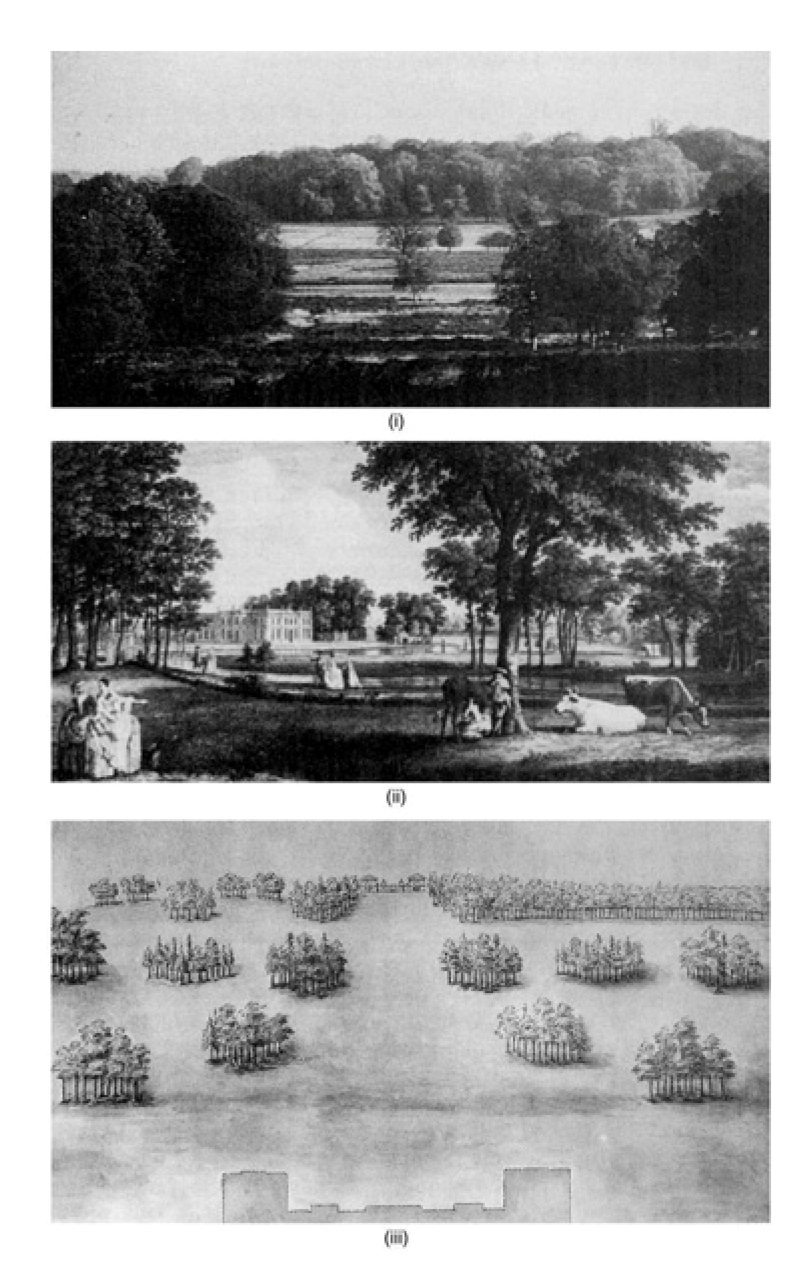


Figura 3.25. Algunos paisajes tipo sabana naturales, hechos por el hombre: (i) Richmond Park, Londres; (ii) Woburn Fram, Surrey, grabado de Luke Sullivan, 1759; (iii) Holkham Hall, Norfolk, (c. 1738), dibujo de William Kent de una plantación sugerida para las praderas del norte.

Los psicólogos han realizado varios experimentos controlados con niños y adultos para descubrir qué ambientes prefieren. Utilizando fotografías es posible eliminar factores extraños (como la presencia de agua o animales) que no son comunes a todas las imágenes y exponer a los observadores a

hábitats de los que no han tenido experiencia directa. Los resultados son interesantes. Se encontró que entre los niños muy jóvenes el ambiente de la sabana era el preferido. (El desierto era el menos preferido). Pero los adolescentes mayores, que tenían experiencia de otros entornos (como bosques de hoja caduca o selvas tropicales), solían apreciarlos tanto como la sabana. La pauta global de los estudios sugiere que, entre los muy jóvenes, hay una preferencia innata por el paisaje de la sabana; esta preferencia se modifica más tarde por la experiencia y el aprendizaje de otros ambientes a medida que los sujetos se hacen mayores.



Lámina 8. Un típico paisaje de la sabana africana que muestra la ventajosa posibilidad de ver sin ser visto.

Cuando la experiencia es limitada y los sujetos están escogiendo a partir de fotografías de ambientes de los que no tienen experiencia, entonces el paisaje de la sabana es el más agradable. Hay pruebas de un sesgo innato a favor de la sabana que, en ausencia de experiencias primordiales en otras condiciones, crea una predisposición estética natural como legado del éxito adaptativo de nuestros ancestros primitivos.

El paisaje de la sabana (Lámina 8 y Figura 3.25) es un ambiente con muchas claves fiables para la habitabilidad humana segura y fructífera. Estos rasgos son ampliamente reproducidos en nuestros parques y áreas de recreo. Hay árboles frondosos que ofrecen sombra y seguridad frente a los predadores feroces, entremezclados con hierba, pero hay amplias vistas con frecuentes ondulaciones que permiten buena visión, orientación y guía para el camino. La mayoría de las fuentes de alimento están a menos de uno o dos metros del suelo, mientras que en un ambiente boscoso la vida está concentrada a gran altura del suelo, fuera del alcance, y las criaturas terrestres están condenadas a buscar en la basura las sobras que caen de la bóveda del bosque[25]. La impredecibilidad más distintiva en la vida de la sabana es la disponibilidad de agua. Aquí se reconoce la importancia de claves como la formación de nubes, los cambios de temperatura y perspectivas climáticas, y las variaciones estacionales en el color y la vitalidad de la vida vegetal, junto con los niveles de agua en ríos y corrientes. La sensibilidad a estos indicadores del ambiente tiene una clara ventaja adaptativa sobre la insensibilidad. La presencia de árboles, follaje y agua ofrece una evaluación instantánea de la idoneidad de un hábitat potencial. Estos indicadores primarios, junto con un sentido de la apertura del terreno, sus perspectivas de abrigo, y la visión furtiva de los demás, son sensibilidades valiosas que indican si puede hacerse con seguridad una posterior exploración o asentamiento. Si el entorno se estima seguro para la exploración, entonces otras características hacen resaltar los lugares más atractivos. La topografía debe permitimos una fácil orientación; los puntos de referencia, curvas y

---

[25] El hábitat tiene un efecto importante en el comportamiento social. En su influyente, aunque controvertido, libro *Sociobiología,* E. O. Wilson describe algunas diferencias que cabría esperar que se desarrollasen entre las poblaciones de moradores de la sabana y de los bosques. «Las criaturas que moran en los bosques serán normalmente más solitarias que las que moran en la sabana, que tienden a ser gregarias: en espacios abiertos hay seguridad en el número (para la caza); en la selva es más fácil ocultarse si uno va en solitario y también es más fácil acosar sigilosamente a una víctima. Los animales solitarios tienden a ser más hostiles (agresivos) frente a otros miembros de su especie, y desarrollan comportamientos, tales como exhibiciones especiales, cuyo efecto último es dar a cada individuo su propio espacio o territorio». Mientras que el movimiento rápido y la visión aguda estarán favorecidos en los moradores de la sabana, los sentidos agudos del olfato y el oído serán más ventajosos para los crípticos moradores de la selva.

variaciones son bien recibidos por el ojo, mientras no creen complejidades confusas o enmascaren peligros.



Lámina 9. Una obra de arte que muestra una situación peligrosa: detalle de Barcos navegando con fuerte oleaje, de François Étienne Musin. El título de esta obra merece un premio al eufemismo

También reconocemos el incentivo para la exploración que crea el elemento misterioso en el terreno: el sendero que lleva fuera de la vista o detrás de una colina. Su exploración posterior será segura sólo si combina aventura con precaución automática y un instinto para retroceder ante el peligro. Esta sorprendente fascinación por el riesgo y el peligro nos atrae hacia todo tipo de adornos culturales: desde historias de terror y viajes en la montaña rusa hasta pinturas de naufragios (Lámina 9) y películas de catástrofes; surgen de un impulso heredado a explorar y comprender los entornos tan extensamente como sea posible desde el punto de vista más seguro posible (Figura 3.26). El hecho de que estos riesgos sean potencialmente fatales es

la razón por la que un deseo de informarse más completamente sobre su naturaleza tiene ventaja selectiva sobre una actitud de indiferencia apática.

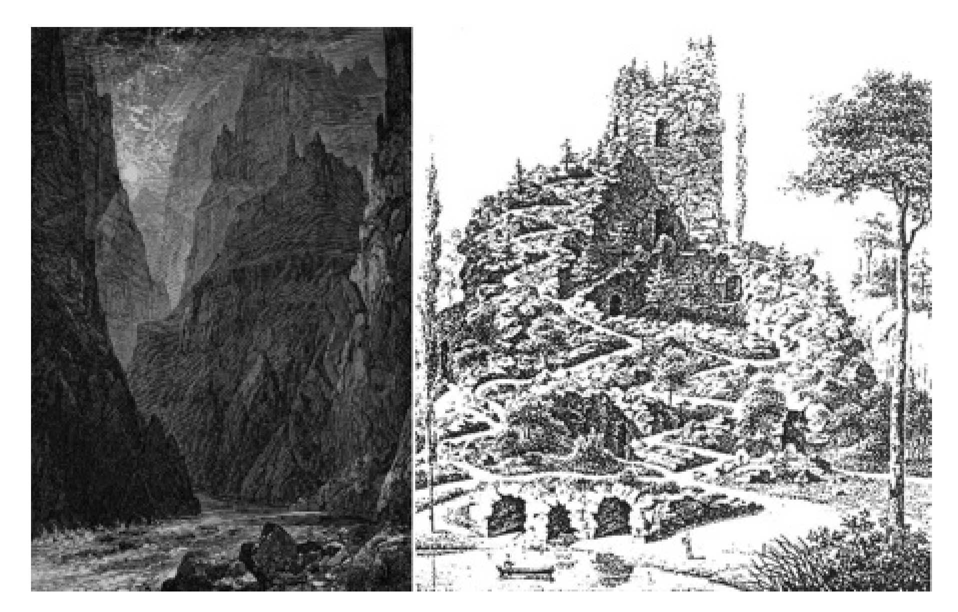


Figura 3.26. Izquierda. Algunas obras de arte apelan al impulso de explorar territorio desconocido: (p. 173) Gran Cañón del Colorado, de Exploración del río Colorado del Oeste, 1869, de John Wesley Powell. Derecha. Figura 3.26. (p. 174) A. Boens, El roquero del castillo de Attre, Bélgica, 1825.

Hay una clara ventaja adaptativa a ganar escogiendo entornos que ofrecen lugares seguros y visiones despejadas del terreno —que permiten ver sin ser visto— suavizadas por una misteriosa invitación a explorar. Estas combinaciones siguen siendo una preferencia innata: su atractivo informa muchas de nuestras preferencias estéticas, desde la arquitectura paisajística a la pintura. Vistas amplias y acogedoras chimeneas, castillos tenebrosos, el árbol-casa, la «Casa de la pradera»; la misteriosa puerta en el muro del jardín secreto; muchas de las clásicas escenas de paisajes seductores combinan signos de refugio y seguridad con la perspectiva de vistas panorámicas ininterrumpidas o la tentación para explorar, suavizada por los pastos verdes y el agua. Estas escenas confortables y pastoriles apelan a nuestras sensibilidades instintivas debido a las ventajas selectivas que tales

atracciones tuvieron inicialmente para nuestros antiguos antepasados (Figura 3.27).

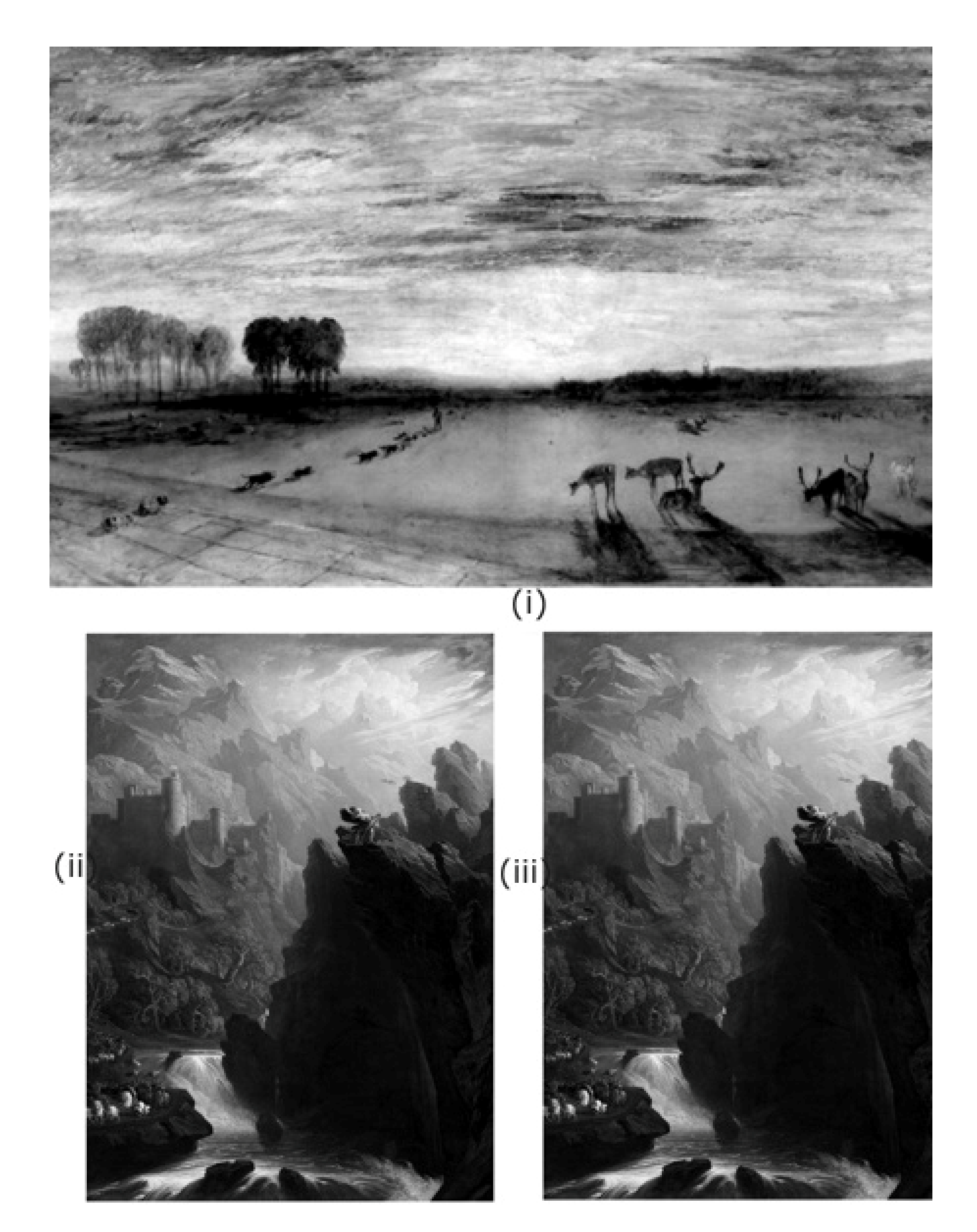


Figura 3.27. Ejemplos de paisajes que muestran imágenes de (i) una panorámica abierta ilustrada por Petworth Park: Iglesia de Tillington al fondo, de J. M.W. Turner, 1828, Tate Gallery; (ii) un paisaje dominado por la imagen de un refugio, ilustrado por El bardo, de John Martin, 1817, Laing Gallery, y (iii) un equilibrio entre imágenes de perspectiva y refugio, ilustrado por Castillo en las rocas, de C. F. Lessing, 1828.

Figuran de forma destacada en nuestros más apreciados diseños paisajísticos, parques públicos y jardines, donde están calculados para ayudar a la relajación e inducir sentimientos de paz y bienestar. Arquitectos distinguidos, como Frank Lloyd Wright, han puesto un énfasis particular en la deseabilidad de crear doseles y refugios dentro de los edificios, y a menudo colocarlos frente a vistas panorámicas, o incluso cascadas de agua, para aumentar la sensación de seguridad que crean estos nichos acogedores.

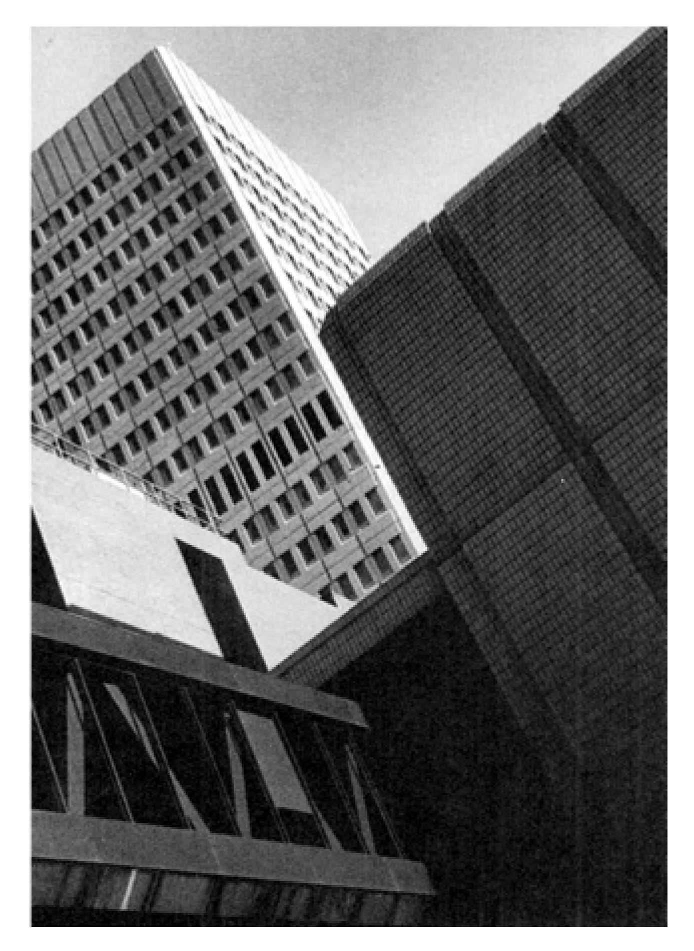


Figura 3.28. Un edificio urbano desagradable que no ofrece ninguna sensación de acogida o refugio.

Techos inclinados, colgantes, voladizos y porches son características arquitectónicas que acentúan la sensación de refugio frente al mundo

exterior, mientras que terrazas, plazas y ventanales satisfacen nuestro deseo de una perspectiva de amplio alcance. La utilización hábil de árboles y agua en el diseño de edificios y jardines puede reforzar estas características. Su negación en muchos edificios y proyectos urbanos ha tenido consecuencias muy evidentes: cemento, pasarelas descubiertas, innumerables ángulos ciegos, predecibilidad gris y banal, que no dan refugio para nadie más, y edificios que no ofrecen ningún atractivo para entrar: estas abominaciones han llevado a la depresión, el crimen y el desequilibrio emocional (Figura 3.28).

La guía breve de la arquitectura moderna de Mike Harding vuelve a despertar los temores que tan felizmente había disipado el salmista:

> *El urbanista es mi pastor, él me guía; por subterráneos y túneles oscuros me obliga a caminar.*
> *Hace que cañones de cemento se alcen por encima de mí.*
> *Me hace caminar por ríos de tráfico.*
> *Él derriba todo lo que es bueno, endereza las curvas.*
> *El hace de la ciudad una tierra yerma y un aparcamiento.*

Con la oscuridad llega la importancia del fuego; las llamas vacilantes siguen fascinándonos. El fuego era el centro de la vida cuando llegaba la oscuridad, ofreciendo calor y seguridad, camaradería y luz. Inflama fuertes emociones —positivas y negativas— por sus ofertas contrapuestas de confort y peligro. Esta mezcla singular de miedo y fascinación aparece en otros lugares. Los animales grandes son extrañamente atractivos, pero amenazadores. Los animales grandes fueron en otro tiempo un peligro y una fuente fácil de alimento abundante. Nuestra atracción instintiva hacia ellos, atemperada por el miedo y el respeto, parece un residuo de una reacción que aumentaba la probabilidad de supervivencia, frente a una respuesta de miedo y aislamiento

total, o una de familiaridad. Los animales eran la clave para la supervivencia de nuestros ancestros. No es sorprendente que las reacciones instintivas hacia ellos evolucionaran y se extendieran. El carácter instintivo de dichas reacciones indica la propensión que tenemos hacia el simbolismo que utiliza animales. El dominio del león, la libertad alada del águila, la malvada serpiente, la agilidad de la gacela: son algunos de los símbolos que operan en nuestra historia ambiental.

Nuestras preferencias estéticas son una fusión de instinto y experiencia. Cabría esperar que, en ausencia de experiencias y de influencias especiales, permanecieran nuestras sensibilidades innatas hacia estas características favorables a la vida en las escenas naturales. De hecho, los paisajes sencillos y las escenas tranquilas suelen ser preferidos por quienes no tienen un interés especial en el arte. Un gusto por la vanguardia o lo abstracto es fruto de una experiencia que supera al instinto. Incluso entonces, lo que atrae en el arte hecho por el hombre es el juego simbólico, o el contrajuego, de esas mismas características adaptativas que durante tanto tiempo han informado las imágenes artísticas tradicionales.

«El tiempo y la marea no esperan a ningún hombre», pero quien esté alerta a las señales que anuncian cambios ambientales importantes estará mejor equipado para sobrevivir a ellos. Nuestra capacidad de alerta y sensibilidad a tantas de las características transitorias de nuestro entorno —el alargamiento de las sombras que señala el final de la luz del día, las nubes oscurecidas o los vientos huracanados que anuncian frío o tormenta, el horizonte lejano que oculta lo desconocido «sobre las montañas y más allá»— son indicadores que reclaman respuesta y apreciación. Nuestra fascinación por las puestas de sol y las figuras de las nubes, nuestra sensibilidad a los matices de luces y sombras en la representación del mundo natural, la amenaza de la tormenta y la tempestad: todos estos sentimientos instintivos tienen sentido como residuos de reacciones a cambios en el entorno que requieren evaluación y respuesta. La sombra proporciona nueva

información sobre distancia y profundidad; ofrece la perspectiva de una apreciación más detallada del entorno.

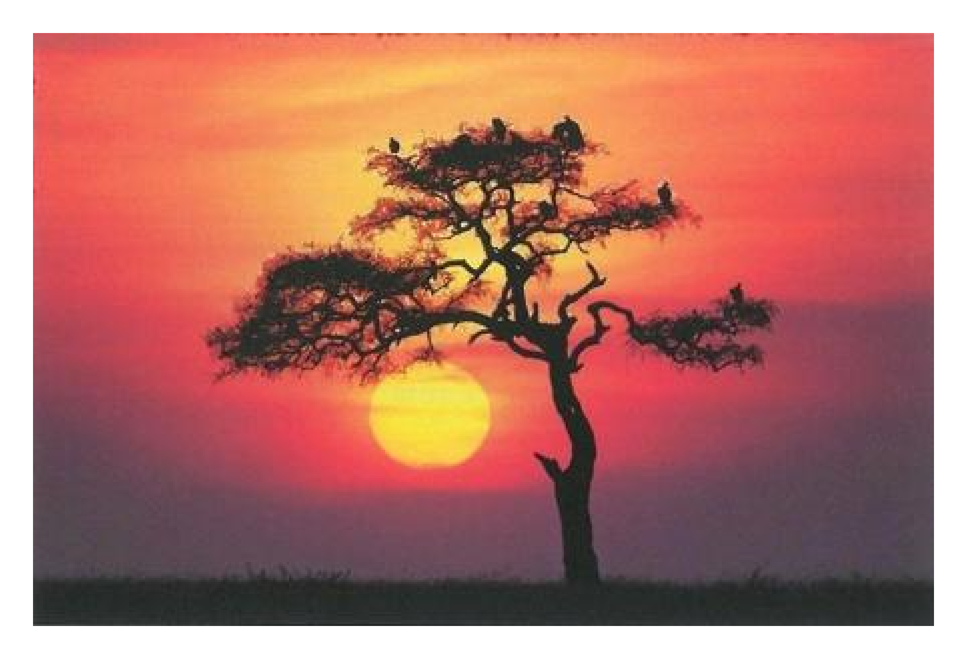


Lámina 10. Puesta de sol.

El peligro acecha en las sombras; recompensa ser especialmente sensible a él. La atención a la puesta del Sol (Lámina 10) y a las sombras que indican la llegada de la oscuridad, y la necesidad de cambiar pautas de comportamiento para asegurar el calor y la seguridad, tienen una clara ventaja sobre el desinterés. Por el contrario, la reacción a la apariencia del Sol cuando está lejos de la salida o el ocaso no ofrece nada de importancia vital para los organismos. Uno no necesita saber que el Sol está en lo alto para decir que hace demasiado calor.

Para los moradores de la sabana tropical, los cambios diarios en luz y temperatura son regulares y rápidos, pero otros cambios críticos son lentos y sutiles. El elemento más impredecible del paisaje de la sabana es la variación estacional de pluviosidad. Por lo tanto, esperaríamos encontrar en los seres humanos adaptaciones que manifiesten sensibilidad a los indicadores de cambio estacional y de pluviosidad inminente y fructífera. Vemos respuestas

emocionales a los cambios estacionales en los colores de las hojas y arbustos: la gente vuela a New Hampshire en otoño. Encontramos las flores bellas, terapéuticas y románticas. ¿Qué haría el patio de un hospital sin ellas? ¿Qué regalo más normal para un ser querido? ¿Qué tema más común que una naturaleza muerta? ¡Y qué esfuerzo dedica el horticultor para producir flores más grandes y más brillantes para nuestra admiración! Nuestro interés inusual por las flores de colores, y las molestias que nos tomamos para cultivarlas y arreglarlas, es impresionante. No comemos flores, pero la apariencia de las flores es una clave útil que permite que formas vegetales diferentes sean rápidamente identificadas y distinguidas. Si no hay flores presentes, todas las plantas son verdes y sólo pueden distinguirse mediante una inspección detallada. Las flores dan también información sobre el fruto. Así, aunque las plantas dan flores por razones que no tienen nada que ver con nuestros gustos o manías, el hecho de que una sensibilidad a las flores tenga un propósito, que es adaptativo, nos proporciona una clave del origen de lo que de otro modo sería una fascinación completamente misteriosa.

Se ha puesto de moda considerar las preferencias estéticas humanas como respuestas totalmente subjetivas al aprendizaje y la educación. Esto ahora apenas parece creíble. Nuestras sensibilidades y respuestas emocionales no han sido creadas de la nada. La evaluación de los entornos fue un instinto crucial para nuestros ancestros lejanos, uno del que dependía su propia supervivencia. Las respuestas adaptativas que hemos heredado de ellos forman una base sobre la que se asienta nuestra experiencia. En muchas manifestaciones de las artes visuales vemos claros residuos de imperativos pasados, quizá ahora sustituidos por símbolos o subvertidos, pero innegablemente presentes en nuestras representaciones y recreaciones de paisajes naturales. Incluso donde las representaciones artísticas están cargadas con simbolismos artificiales de tipo religioso o romántico, podemos encontrar a menudo una resonancia de fondo que es eco de nuestras

emociones innatas. Los fondos de retratos y obras religiosas contienen a menudo escenas que combinan imágenes de seguridad, peligro y espacios abiertos. Un equilibrio de estos tres ingredientes puede despertar emociones encontradas y ambigüedad.

Deberíamos apreciar que estas ideas sobre los orígenes de la respuesta estética serían consideradas profundamente heréticas por muchos críticos de arte, a quienes les gusta creer que la apreciación artística es inmune al análisis «científico». Pero consideremos cómo hemos apreciado el papel de las estructuras matemáticas en la estética. Utilizamos formas particulares o pautas simétricas cuando queremos realzar estas armonías matemáticas subyacentes. Nuestro conocimiento del comportamiento de la luz, o de la percepción del color, que se hizo posible gracias a los estudios de los físicos, se explota al máximo para crear imágenes que son atractivas y agradables a la vista. Cabría sospechar que nuestra afinidad por estas pautas geométricas y ópticas está ligada a la facilidad con la que el cerebro puede producir modelos mentales de ellas y al grado en que son ejemplificadas en el mundo natural en situaciones donde su reconocimiento será recompensado. Estos importantes aspectos matemáticos y ópticos de la estética deben añadirse a la perspectiva biológica que proporciona la evolución adaptativa. Arroja luz sobre nuestra atracción por los símbolos en el arte y revela por qué imágenes concretas pueden ponerse tan eficazmente al servicio de evocar respuestas emocionales. El arte no sería una actividad humana universal si no hubiera respuestas y resonancias emocionales universales que pudiera despertar. Si los seres extraterrestres evolucionaron por selección natural, esperaríamos que su entorno les hubiera presentado desafíos completamente diferentes del nuestro. Tendrían que haber afrontado dichos desafíos heredando reacciones instintivas a su entorno que tuvieran valor de supervivencia. Cabría esperar que también retuvieran respuestas emocionales acentuadas a aquellos aspectos de su entorno cuya apreciación fuera ventajosa para su supervivencia. Sabiendo algo de su entorno y de sus

sentidos (que también estarían adaptados a sus condiciones ambientales: niveles de luz, niveles de sonido, visibilidad y demás), podríamos aventurar imágenes de refugios seguros, puntos claros de observación y peligros que produjeran respuestas instintivas. Si nos presentaran ejemplos de sus creaciones y preferencias artísticas, es así como podríamos empezar a interpretarlos y comprenderlos. Aunque sus símbolos de seguridad, peligro y visión panorámica podrían haber sido modificados por sus prácticas sociales hasta el punto de ser ahora irreconocibles, si quedaran huellas seríamos capaces de dar los primeros pasos hacia la comprensión de cómo trabajaban sus mentes.

Figuras en un paisaje. El dilema del arte por ordenador

Si de repente empezamos a romper los lazos que nos ligan a la Naturaleza y nos dedicamos puramente a la combinación del puro color y la forma independiente, produciremos obras que son mero diseño geométrico, algo parecido a una corbata o una alfombra.

WASSILY KANDINSKY

Las fuentes de nuestro cariño por los paisajes naturales arrojan luz sobre nuestras respuestas a los paisajes antinaturales. La ubicuidad de potentes sistemas informáticos ha creado una explosión de gráficas por ordenador que adornan galerías, dormitorios, estanterías y postales. El ordenador puede generar imágenes a demanda, con colores escogidos.



Figura 11. Un paisaje generado por ordenador que capta las características fractales de los paisajes reales que se han desarrollado por procesos autosimilares. Nótese, sin embargo, la falta de perspectiva y símbolos de refugio (imagen de Richard Voss).

Esta tecnología ha llevado a la creación de paisajes fractales generados por ordenador (Lámina 11) que muestran sorprendentes similitudes con escenas naturales. Nuestra discusión de la adaptación humana para apreciar rasgos del paisaje nos ayuda a entender nuestras respuestas a escenas generadas por ordenador. Podemos ver cómo su foco en la textura de paisajes a pequeña escala excluye cualquier reconocimiento de la importancia de asociaciones simbólicas mezcladas de perspectiva, refugio y peligro. Están dominados por vistas y amplios horizontes, pero carecen de la inclusión deliberada de símbolos de refugios y estímulos a la exploración. No resuenan con nuestra adaptación evolutiva a respuestas emocionales a símbolos paisajísticos particulares. No son paisajes hacia los que nos sintamos atraídos. De todas formas, hay algo intrigante en estas imágenes: algo que es compartido por otros muchos ejemplos de arte por ordenador. Para

identificar de qué se trata, podríamos considerar algunas cuestiones fascinantes planteadas por imágenes generadas por ordenador que se presentan como obras de arte.

El arte por ordenador amenaza con dar la vuelta a siglos de reverencia por el concepto de una obra de arte «original». Pues ¿qué es «lo original» de una obra de arte por ordenador, cuando se pueden sacar innumerables copias idénticas en la impresora láser? El original muestra la marca de la propia mano del artista, lleva la firma del artista, muestra las pinceladas detalladas que utilizó para hacerla. La fotocopia carece de todos estos toques personales. Algunos sienten que esto es una devaluación subversiva de la obra de los artistas que acabará por reducir su demanda. Pero, aunque el artista por ordenador no puede poner un precio elevado a la singularidad de una de sus copias impresas, puede compensar esto gracias a la enorme cantidad de obras que puede producir. Una devaluación del estatus de la obra de arte original podría incluso ser bienvenida en algunos sectores. Impediría que la propiedad de obras de arte sea básicamente una actividad de los ricos, y que la adquisición y posesión de obras de arte sea para algunas personas simplemente una inversión financiera. Indudablemente hay muchos a quienes no les gustaría ver una revolución tan igualitaria. Cuestiones como éstas muestran que el arte por ordenador es delicado. Aunque quizá no ha producido (todavía) obras de una belleza que supere a las de los artistas humanos, plantea nuevas preguntas sobre la naturaleza del arte. Herbert Franke ve el efecto a largo plazo de este mundo de arte rival como una dramática revolución en nuestra actitud hacia el arte y lo que podemos esperar de él:

> *La desmitificación del arte es uno de los efectos de mayor alcance del uso de los ordenadores en las artes. En cuanto se reconoce que la creación del arte puede ser formalizada, programada y sujeta a tratamiento matemático, todos aquellos secretos que se utilizaban para consagrar el arte*

desaparecen. Lo mismo sucede con la recepción del arte; la descripción de la realidad en términos racionales aleja inevitablemente de los modos irracionales de pensamiento, tales como la idea de que el arte causa efectos que no pueden describirse científicamente o que el artista transmite al público información que no podría ser expresada de otra manera. Y con ello el arte pierde su función como un sustituto para la fe, que aún cumple aquí y allá.

La reproducibilidad del arte por ordenador es una consecuencia de su cualidad de «pulsar un botón». Parece estar dominada por la tecnología utilizada en su fabricación. La tecnología se utiliza hoy en la pintura convencional: proporciona pinturas acrílicas, pinceles y otros materiales y métodos innovadores, pero éstos todavía pueden considerarse como mejoras a las herramientas y técnicas tradicionales que son vehículos para la expresión, antes que la esencia de dicha expresión. El arte por ordenador, por el contrario, parece totalmente dependiente del computador para su presentación. Es un reflejo del estado de la tecnología de computadores y de la estructura de algoritmos impersonales concretos. El artista Gary Glenn lo ataca como la última actividad basura:

El arte por ordenador está vacío de sentimiento; no hay encuentro directo con los materiales. Los materiales tradicionales no ocultan lo que se ha hecho; hay pinceladas, marcas de cincel... Hay un registro de los gestos y la presencia del artista. Hay una carencia absoluta de humanidad en el arte generado por ordenador. ¿Es un artista quien trabaja solamente con ordenadores y solamente por razones estéticas o artísticas?

Las obras de arte por ordenador han sido exhibidas, en cualquier caso, en las más famosas galerías del mundo. Hay revistas dedicadas a su valoración. Se hacen películas multimillonarias que giran en torno a efectos artísticos especiales que sólo los ordenadores pueden crear. Pero ¿es realmente arte? Quizá depende de a quién se pregunte y cómo. Cliff Pickover, un reputado virtuoso de las gráficas por ordenador de IBM en Nueva York, invitó a los lectores de uno de sus libros a enviarle sus opiniones. El resultado fue una ilustración clásica de la muestra sesgada; él señala que «una mayoría de los que respondieron a "¿es el arte por computador realmente arte?" por correo electrónico decían "sí". Una mayoría de los que me escribieron sus respuestas en papel de cartas a través del correo convencional, decían "no"». También es difícil evaluar la respuesta del público a las obras de arte por ordenador, porque muchos de los que aman el arte por ordenador lo hacen porque admiran la habilidad técnica que testimonia —les gusta la representación por ordenador de una escena que sería de poco o ningún interés estético si fuera presentada como un cuadro o una fotografía—. En el caso de figuras intrincadas, como el conjunto de Mandelbrot, el testimonio de los matemáticos es equívoco porque su juicio está sesgado por un conocimiento de la extraordinaria estructura que se está representando —que es más notable porque sus propiedades más extraordinarias no pueden ser captadas por ninguna imagen finita.

Robert Mueller mantiene que las imágenes que aparecen a partir de la implementación de fórmulas matemáticas y algoritmos informáticos no son verdaderamente artísticas porque son esencialmente secundarias: son representaciones que están limitadas por reglas externas.

Aunque podemos decir que las matemáticas no son un arte, algunos matemáticos se consideran artistas de la forma pura. Parece evidente, sin embargo, que sus formas elegantes y casi estéticas fallan como arte, porque son ideas visuales secundarias, producto de un conjunto de restricciones

intelectuales antes que la causa de una intuición realizada en y a través de la forma visual.

Mueller piensa que, mientras que el artista crea imágenes libremente, el artista por ordenador está simplemente explorando los límites de un procedimiento, de un algoritmo o del número de colores que puede mostrar su impresora. Pese a todo, quizá la situación es más sutil. El artista puede sentirse libre de ataduras técnicas, pero, como hemos visto, hay sesgos inadvertidos y ligaduras impuestas por nuestra historia evolutiva. Lo que creamos debido a afinidad emocional o lo que creamos para anular afinidad emocional: ambas cosas son producto de ligaduras, cuya influencia puede ser mucho más abrumadora que las que controlan el algoritmo informático. Además, la reacción de la mayoría de los artistas a las gráficas por ordenador está matizada por el hecho de que la pintura es la forma de arte menos influida por hallazgos tecnológicos. Los pigmentos naturales esparcidos por brochas de pelo han estado sujetos a muy pocas innovaciones. Un contraste interesante lo proporciona la música. Como la pintura, es universal entre las culturas humanas, y puede ser rastreada hasta el alba de la historia registrada. Pero, a diferencia de la pintura, tiene una tradición igualmente antigua de utilizar artefactos para generar sonidos que los humanos no pueden producir de forma natural. Más aún, en tiempos modernos, la producción y la grabación de música han incorporado muchos tipos de artefactos electrónicos. Como consecuencia, la creación de música electrónica está a menos distancia de la música tradicional que el arte informático lo está del arte humano. La distinción entre música generada por ordenador y música «humana» es mucho menos evidente para el oyente casual que la distinción entre arte por ordenador y arte humano para el observador casual.

Volvamos a la cuestión de lo que nos atrae hacia las imágenes fractales generadas por ordenador. Nos hemos detenido en aquellos subproductos de nuestra historia evolutiva que nos adaptaron para la supervivencia en los

primitivos ambientes de la sabana, pero para llegar a esa etapa de desarrollo muchas otras y más básicas respuestas han sido descartadas por la selección natural. Quizá la más básica de todas es una capacidad para sentir y clasificar pautas. Esta capacidad permite identificar el peligro en el entorno, reconocer amenazas y oportunidades pasadas cuando reaparecen, y clasificar pautas de sucesos y conjuntos de cosas. Es adaptativo seleccionar experiencias que ayuden al proceso de clasificar pautas en el entorno. Hay un amplio grupo de estructuras, que podemos clasificar como simétricas, bellas o estéticas, cuyas pautas nos son fáciles de captar y hacia las que cabría esperar que estemos predispuestos. Además, vemos que los seres vivos tienden a distinguirse de las cosas naturales no vivientes (frente a los objetos manufacturados que ahora nos rodean) por su simetría. Como ya hemos discutido, los seres vivos poseen simetría izquierda-derecha respecto a un plano vertical; si se mueven no poseen simetría delante-detrás, y la gravedad dicta una asimetría arriba-abajo. Cualquier predisposición hacia la detección y la respuesta a pautas con simetría izquierda-derecha podría resultar altamente adaptativa. Revelaría cuándo se acercaba otro animal en nuestra dirección, mirándonos. Esto podría ser una señal para escapar, para prepararse para la cena o para considerar la perspectiva de una posible pareja. Una respuesta a la simetría no siempre será correcta, por supuesto; uno podría estar mirando una roca bellamente redondeada, en lugar de un predador. Se requieren respuestas seguidas para obtener más información. Pero el coste de construir una sencilla respuesta instintiva a la simetría es bastante pequeño comparado con los beneficios. El valor de supervivencia de un rápido reconocimiento de pautas es considerable.

Si podemos identificar pautas en un paisaje, entonces es más probable que lo exploremos. Una vez más, como sucede con nuestras respuestas innatas al paisaje, no estamos encadenados por estas disposiciones. Pueden ser reescritas por la experiencia, pero en ausencia de experiencias formativas individuales nuestras respuestas heredadas a las pautas serán las respuestas

por defecto. Y, como sucede con otras actividades con alto valor de supervivencia, como comer o volver a casa a salvo, inevitablemente se harán placenteras. En el caso de las pautas fractales estamos expuestos a una forma altamente desarrollada de pauta organizada que también está presente en el mundo natural (en hojas, árboles y formaciones rocosas); por lo tanto no es sorprendente que nuestra capacidad para identificar, seleccionar y clasificar pautas sea activada y aumentada por obras de arte fractal. Pero el carácter soso y poco atractivo de los paisajes fractales es testimonio de su incapacidad para excitar las respuestas más específicas del hábitat que sí evocan los atractivos paisajes naturales. Todo el arte por ordenador está fuertemente sesgado para atraer la atención de las habilidades más básicas de reconocimiento de pautas de nuestro cerebro, y el hecho de que esta forma de representación tiende a excluir la mayoría de las formas tradicionales de simbolismo sólo sirve para acentuar la respuesta a las pautas. Hay mucho lugar para que la apreciación estética florezca como un subproducto de la selección para el reconocimiento de pautas. Considerando el reconocimiento de pautas como un tipo de juego realizado contra una amenaza ambiental potencial, podemos ver por qué cabría esperar que nuestras mentes sean supersensibles a la presencia de pautas. Las consecuencias negativas de «ver» pautas cuando no hay ningún león acechando son muy pequeñas comparadas con las consecuencias fatales de no identificar a un león cuando está allí. Por ello es comprensible una tendencia hacia la paranoia, el autoengaño y una supersensibilidad a la presencia de pautas.

Esta sensibilidad a identificar pautas tiene manifestaciones que son especialmente interesantes porque aparecen en muchas culturas del Medio Oriente donde está prohibida la representación artística de seres vivos. Cuanto más se examinan los productos ordenados del arte por ordenador, con su énfasis en la simetría y la reflexión, más se siente que son ejemplos de exploración de pautas en lugar de arte. Podemos imaginar un antiguo

debate entre árabes y europeos respecto a si sus respectivas formas de arte eran «realmente» arte.

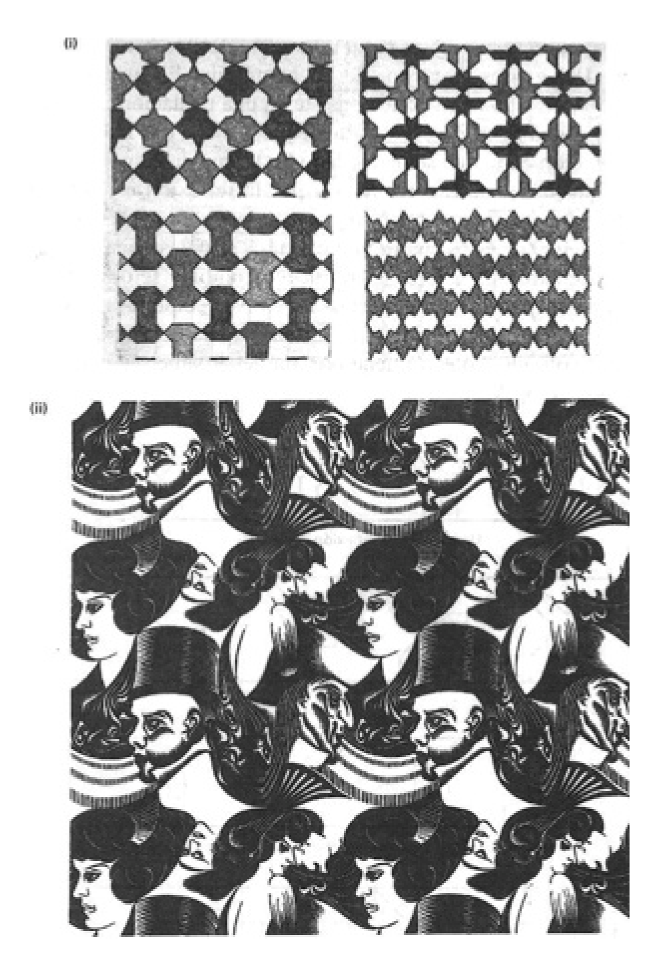


Figura 3.29. (i) Diversas pautas de teselación islámica utilizadas por los diseñadores árabes de La Alhambra, bosquejadas por Maurits Escher; (ii) Ocho cabezas, de Maurits Escher, 1922. Un primer grabado hecho cuando el artista era un alumno de la Escuela de Arquitectura y Artes Decorativas en Haarlem.

A lo largo de la historia, los seres humanos han producido diseños decorativos en forma de mosaicos, teselas y frisos. La tradición islámica es especialmente notable a este respecto, porque las enseñanzas de *El Corán* prohíben la representación de seres vivos con fines decorativos. En consecuencia, los árabes explotaron todo el espectro de complejidad que

permite la geometría, tanto en superficies planas como en superficies curvas. La intuición geométrica de sus artistas sobrepasaba la que muestran los matemáticos contemporáneos. Tienen mucho en común con la obra de Maurits Escher, que también ha estimulado nuevos descubrimientos en geometría (Figura 3.29).

En estos ejemplos se ven en acción nuestros instintos para el reconocimiento, generación y clasificación de pautas. El uso sistemático más extendido de las pautas decorativas es el más simple: la creación de frisos lineales. La gama de alternativas no es tan grande como los catálogos de papel de pared nos llevarían a pensar. Hay solamente siete pautas lineales que pueden repetirse en una franja de papel para dar un friso que utilice dos colores; el número total de pautas repetitivas que pueden crearse en una superficie plana para crear un friso, utilizando sólo dos colores, es diecisiete[26].

Cuando se utilizan dos colores (digamos, blanco y negro) para producir un friso lineal, sólo pueden emplearse cuatro ingredientes básicos para crear una pauta repetitiva. El primero es la *traslación*: simplemente mover una pauta a lo largo del friso, *en bloc.* El segundo es la *reflexión* respecto a un eje vertical u horizontal. El tercero es una *rotación* de 180 grados alrededor de un punto fijo. El cuarto es una *reflexión con deslizamiento,* que consiste en una traslación hacia adelante junto con una reflexión de la imagen respecto a una línea paralela a la dirección en la que se ha trasladado, lo que da como resultado que las imágenes especulares creadas por la reflexión estén ligeramente desplazadas una de otra, en lugar de estar alineadas verticalmente. Cada uno de estos cuatro movimientos se muestra en la Figura 3.30. Estas cuatro operaciones sólo pueden combinarse de siete maneras diferentes para producir diseños repetitivos como los mostrados en la Figura 3.31. Las diferentes posibilidades aparecen al actuar sobre un

[26] Si hay C colores, entonces el número de pautas diferentes es 7 cuando C es un número impar, 17 cuando C dividido por 4 deja un resto 2, y 19 cuando C es exactamente divisible por 4.

motivo inicial, que no tiene por qué tener simetría, con las siguientes operaciones:

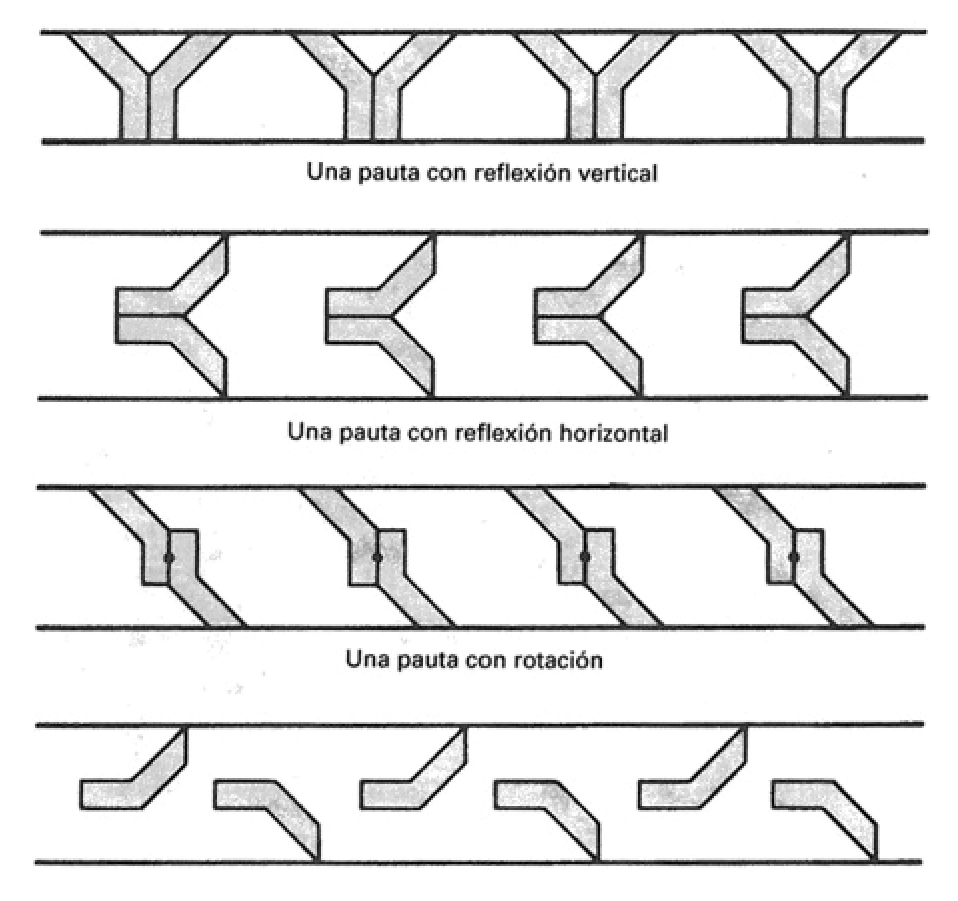


Figura 3.30. Las cuatro operaciones básicas que pueden utilizarse para generar un friso.

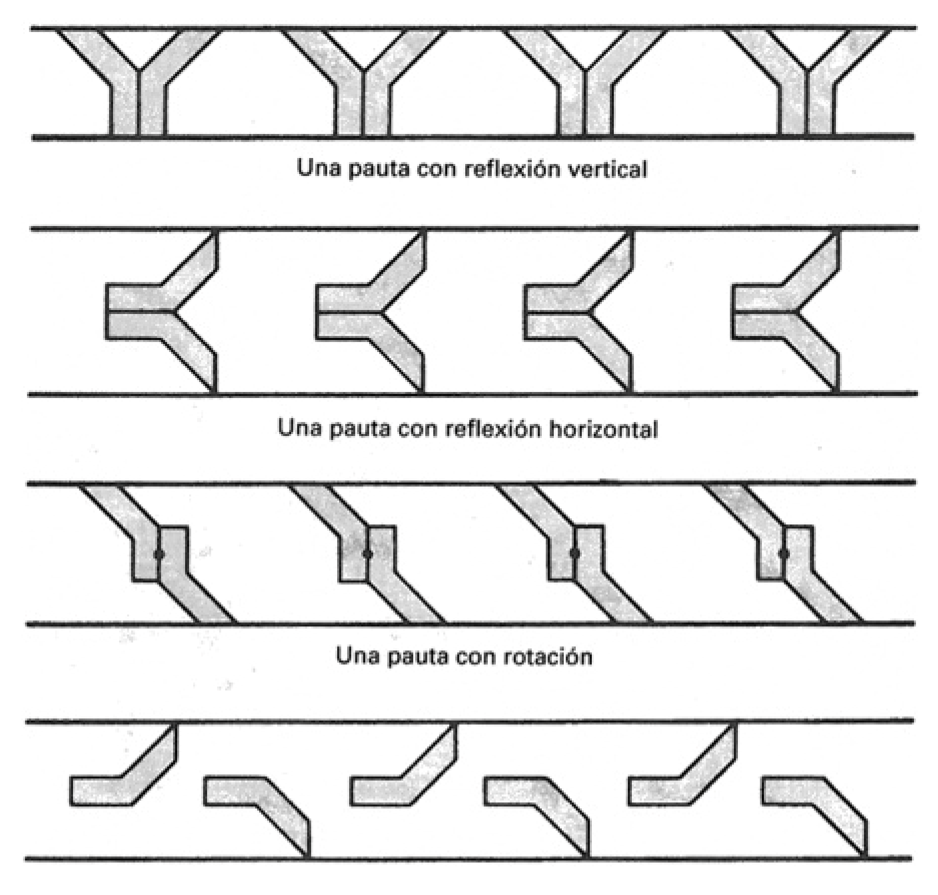


Figura 3.31. Los siete frisos distintos que pueden generarse mediante combinaciones de las cuatro operaciones básicas mostradas en la Figura 3.30. Las etiquetas corresponden a las combinaciones de estas operaciones cuya lista se da en la página 192 del texto.

a) traslación
b) reflexión horizontal
c) reflexión con deslizamiento
d) reflexión vertical
e) rotación de 180 grados
f) reflexión horizontal/vertical
g) reflexión vertical/rotación

Ejemplos de las siete variedades posibles de pautas de frisos se encuentran en decoraciones en todo el mundo antiguo: desde la cerámica de San

Ildefonso a los vasos de los incas y las formas tradicionales de la decoración maorí. Algunos magníficos ejemplos de las siete, tomados de culturas diversas, se muestran en la Figura 3.32.

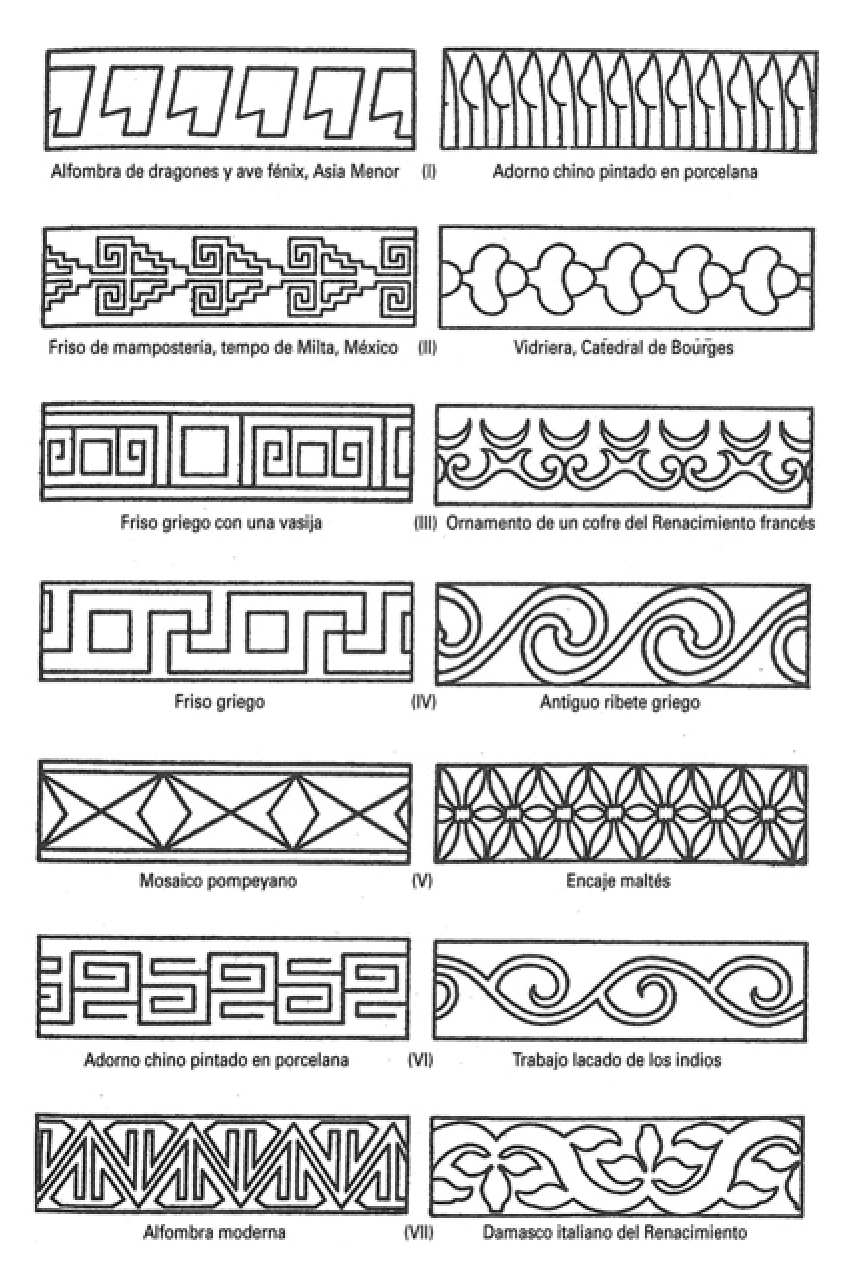
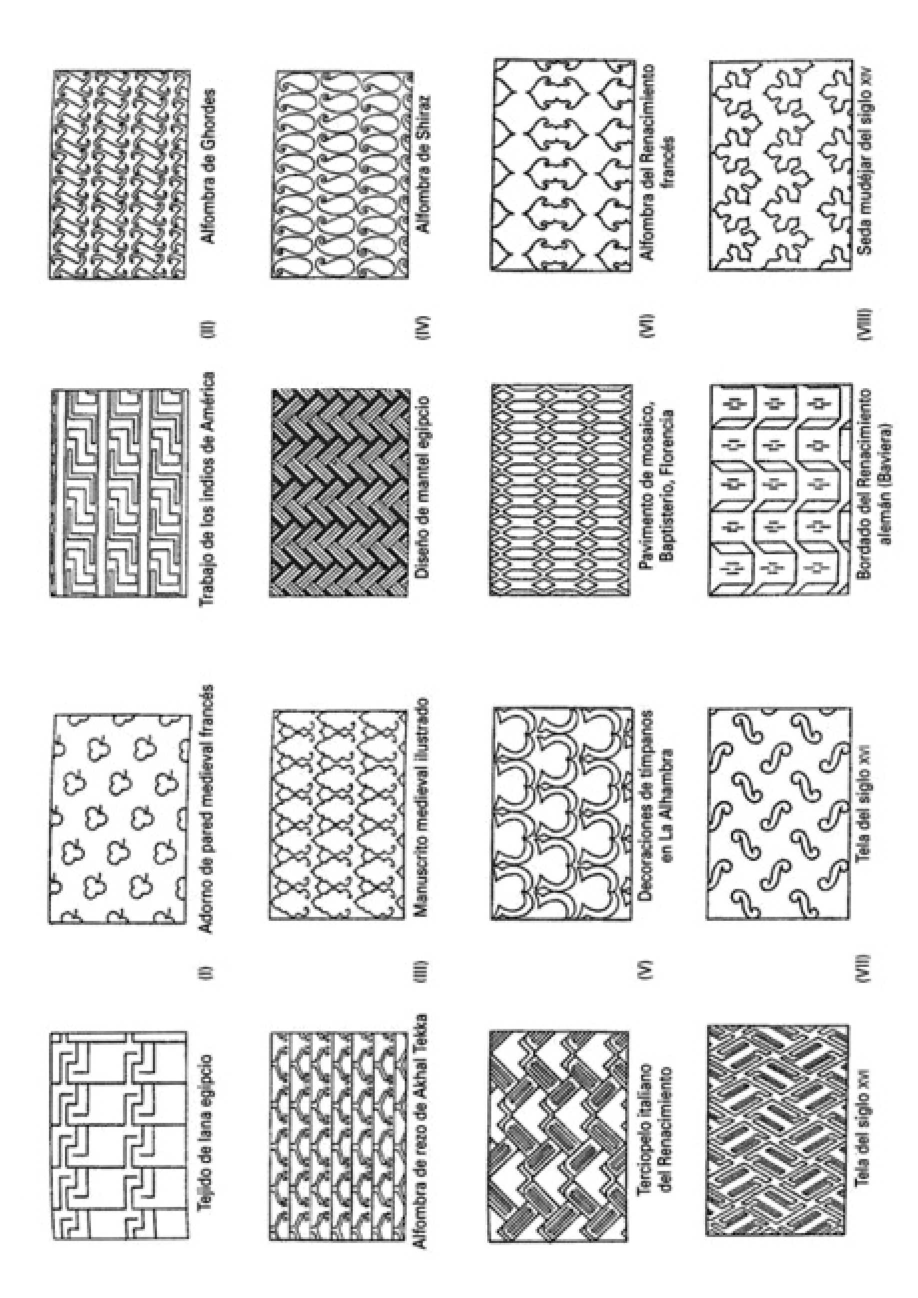


Figura 3.32. Las siete posibles simetrías en frisos, cada una de ellas ilustrada por dos ejemplos tomados de las tradiciones decorativas de culturas diferentes.

Aumentemos una dimensión y pasemos de los frisos al papel de pared. Las pautas simétricas en dos dimensiones tienen más libertad para reproducir utilizando combinaciones de las reflexiones, traslaciones y rotaciones básicas. Hay diecisiete posibilidades, que fueron clasificadas por primera vez por Eugraf Federov en 1881, pero parece que todas eran bien conocidas, y empleadas con fines decorativos, por los antiguos egipcios. Las muestras más espectaculares de ellas se encuentran en las decoraciones de La Alhambra (véase la Figura 3.29 (i)). Los diecisiete ejemplos se muestran en la Figura 3.33, utilizando ejemplos recogidos de antiguas decoraciones en un amplio abanico de culturas. Si nos apartamos de estos diseños regulares, que tienen una estructura reticular que es invariante después de atravesar direcciones verticales u horizontales, entonces el número de diseños posibles crece espectacularmente. De hecho, cualquiera de las pautas puede combinarse con las demás en un número infinito de permutaciones diferentes.


Tejido de lana egipcio
(I)
Adorno de pared medieval francés
Trabajo de los indios de América
(II)
Alfombra de Ghordes
Alfombra de rezo de Akhal Tekka
(III)
Manuscrito medieval ilustrado
Diseño de mantel egipcio
(IV)
Alfombra de Shiraz
Terciopelo italiano del Renacimiento
(V)
Decoraciones de tímpanos en La Alhambra
Pavimento de mosaico, Baptisterio, Florencia
(VI)
Alfombra del Renacimiento francés
Tela del siglo XVI
(VII)
Tela del siglo XVI
Bordado del Renacimiento alemán (Baviera)
(VIII)
Seda mudéjar del siglo XIV

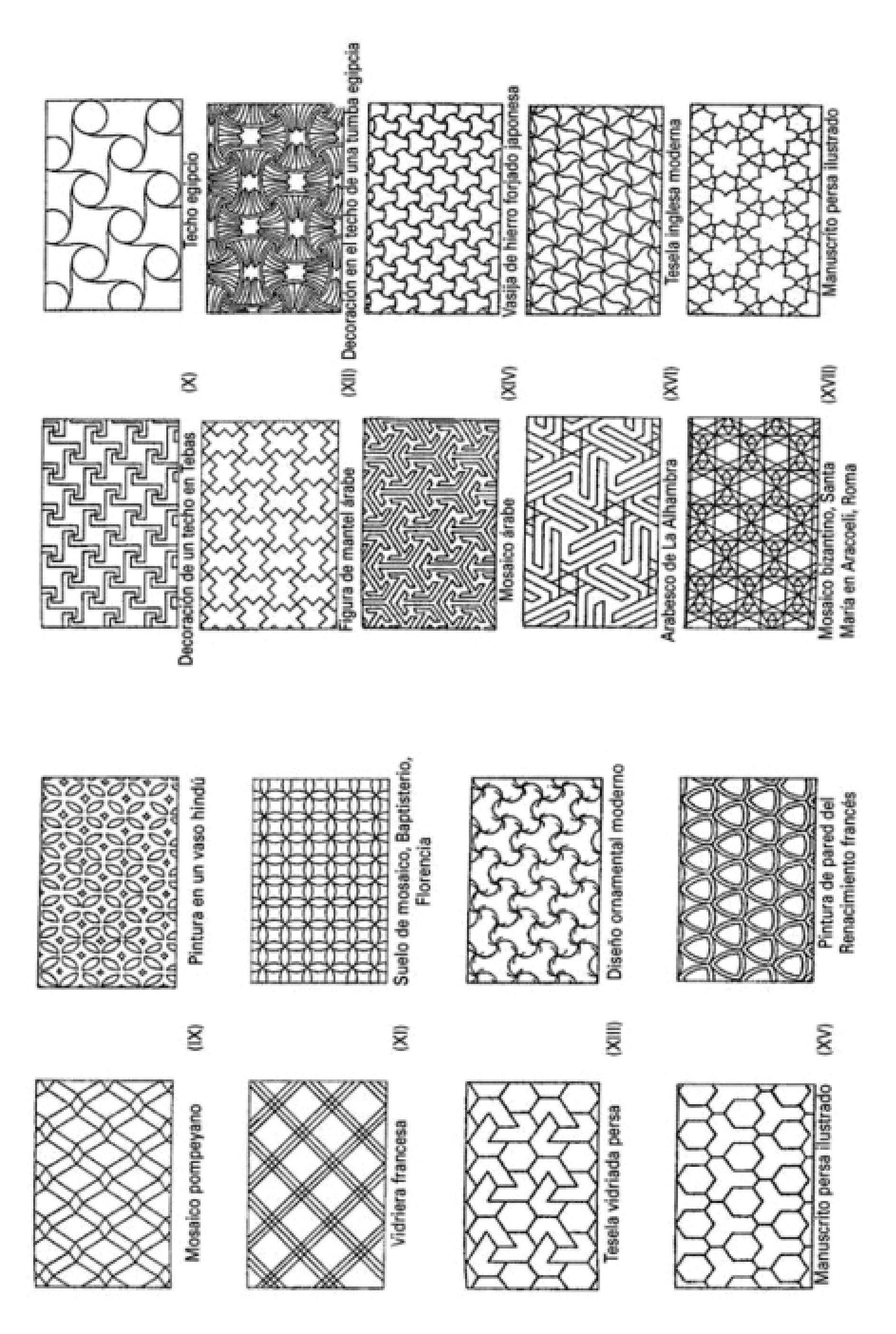


Figura 3.33. Las 17 pautas bidimensionales («papeles de pared») posibles, ilustradas por ejemplos de culturas diferentes.

La ubicuidad de estas formas de decoración, en culturas que carecen de una comprensión matemática de su significado y compleción, es testimonio de la sensibilidad humana hacia las pautas —una sensibilidad que tiene claras

ventajas adaptativas—. En el mundo antiguo, el equivalente del contraste moderno entre arte por ordenador, paisaje y otras formas de arte figurativo iba a encontrarse en el contraste entre decoración y representación de ambientes y seres vivos. La perenne atracción de ambos tipos de imágenes testimonia los diferentes hilos en nuestro mosaico de apreciaciones estéticas. En las formas de pintura más tradicionales las resonancias simbólicas son dominantes sobre el reconocimiento instintivo de pautas; pero, como veremos en un capítulo posterior, los papeles están invertidos en nuestra apreciación de las pautas de sonido.

Hijos de la medianoche. Una primera ojeada a las estrellas

El sensual contraste entre el fondo oscuro —más negro cuanto más clara es la noche y más estrellas podemos ver— y el fuego palpitante de las propias estrellas no podría ser superado por ningún artificio posible.

GEORGE SANTAYANA

Este capítulo empezó con las estrellas. De ellas emergieron los ladrillos bioquímicos de la complejidad, junto con los rayos de calor y luz que promueven y sostienen la nueva forma de complejidad que llamamos vida. Hemos visto cómo las características invariantes del tejido del Universo fijan los tamaños de los cuerpos celestes, y los planetas, de maneras que limitan las formas y tamaños de las estructuras y los organismos en la superficie de la Tierra. Al parecer, la influencia del tamaño es omnipresente y afecta al abanico y las escalas de tiempo de la vida de maneras insospechadas. Conforme dichas restricciones del entorno natural fueron acomodadas por la evolución de organismos adaptativos, la selección llevó a curiosas sensibilidades al entorno, cuyo legado se manifiesta en nuestras

sensibilidades estéticas hacia las escenas naturales y en muchas de nuestras antipatías por lo antinatural. Estas consideraciones revelan algo de nuestras intuiciones de lo natural y lo antinatural; yacen en el corazón de nuestros deseos latentes de apreciar, alimentar y recrear el entorno de maneras sensibles. Nos enseñan algo sobre nuestras respuestas a los símbolos y sobre el placer que obtenemos de las pautas simétricas. Y, con ello, qué agradable conclusión sería que nuestro final pudiera coincidir con nuestro principio, que pudiéramos volver a las estrellas para cerrar esta parte de nuestra historia. Lamentablemente, no lo es. No hemos heredado de nuestros ancestros respuestas a las estrellas; no hay tradición de pintar el cielo nocturno. Ni la esperaríamos. Los cielos cambian lentamente. Mientras que la puesta de sol estimula las respuestas emocionales necesarias para acomodar rápidamente las circunstancias cambiantes, la llegada de las estrellas no señala nada tan urgente en la mente del cazador o el recolector. La tapicería celeste es un gusto adquirido, pero su influencia, aunque sutil, no es menos general. Como vamos a descubrir.

Capítulo 4
Los cielos y la Tierra

La ciencia es análisis espectral.
El arte es fotosíntesis.
KARL KRAUS

Lo que queda del día. Ritmos de vida

La educación es algo admirable, pero es bueno recordar de cuando en cuando que nada de lo que merece la pena saber puede ser enseñado.
OSCAR WILDE

Todos los meses, organizaciones sin rostro me envían facturas. Cada trimestre, otras se les unen. Y, cuando empieza el Nuevo Año, otra caterva de ordenadores decide que mi dirección aparezca en ventanillas de sobres de correo. Estas notificaciones periódicas se repiten en todo el mundo, y la pauta laberíntica de nuestras vidas cotidianas se mantiene unida por un armazón de días, meses y años. Estructuramos el tiempo y organizamos nuestra vida de acuerdo con estos ciclos, y con ello reflejamos las pautas celestes que han estimulado y dirigido la evolución de nuestro entorno. Días y noches, estaciones y mareas, ciclos de fertilidad, descanso y actividad: todo son reflejos de los ritmos que nos imponen los movimientos celestes. Han tenido influencia en dónde y cómo vive la gente, los elementos que deben superar; el refugio y el vestido que deben fabricar y las historias que cuentan sobre todo ello. A través de estos artificios y deseos, los movimientos inexorables de los cielos y la Tierra han arrojado sus sombras sobre nuestros cuerpos, nuestras acciones y nuestras supersticiones acerca del sentido del mundo. En este capítulo exploraremos algunas inesperadas conexiones entre los cuerpos celestes y los patrones de vida en la Tierra.

Examinaremos estos vínculos en diferentes niveles, empezando con las pautas temporales subyacentes en el entorno terrestre y terminando con las respuestas que los seres humanos hemos aprendido a dar al reino astronómico. Estas respuestas aún se manifiestan en nuestra organización social, y también subyacen a muchas de nuestras respuestas metafísicas y emocionales al Universo. Hemos estado tentados a ver las estrellas como dioses, como demonios, como guías de navegación, como profecías de mala suerte o, lo que es peor, como los gobernantes de cada una de nuestras acciones. Descubriremos también que hemos sido extraordinariamente afortunados por encontramos viviendo, por azar, en circunstancias celestes que influyen significativamente en el alcance y dirección de cualquier investigación científica del Universo. Si apreciamos algunas de las delicadezas de esta situación, estaremos mejor situados para evaluar la probabilidad de que organismos extraterrestres alcancen el nivel de comprensión científica del Universo que nosotros hemos alcanzado. Veremos que el progreso no es sólo una cuestión de inteligencia, sino que depende en gran medida de nuestro punto de vista en el Universo.

Los primeros pasos preconscientes de nuestros ancestros primitivos a lo largo del sendero evolutivo se dieron en un mundo con una alternancia diaria de noche y día, una crecida y bajada mensual de las mareas, y una variación anual en las horas diurnas y en el clima. Todos estos cambios de escenario han dejado su impronta sobre los actores en el serial de la vida. Algunos sobrevivieron mejor porque variaciones fortuitas les dieron ritmos corporales que reflejan con precisión el pulso de cambios ventajosos en el entorno. Otros sintieron directa y vivamente algún aspecto de los ritmos celestes y respondieron a sus órdenes de marcha. El mundo está lleno de plantas y animales que han crecido sensibles al ciclo de la noche y el día, el ciclo estacional del calor del Sol y la variación mensual de las mareas. Las mareas oceánicas provocadas por las fases de la Luna influyeron en la evolución de los crustáceos y los anfibios. La formación de regiones con grandes

diferencias entre mareas vivas y muertas, con alternancia de períodos de inmersión y períodos secos, puede haber animado la difusión de la vida del mar a la tierra. Las condiciones cambiantes estimulan la evolución de un tipo de complejidad que lleva a la vida porque crea condiciones en las que la variación supone una diferencia en las perspectivas de supervivencia.

Hay huellas claras de un período anual en los ciclos vitales de los animales. La adaptación evolutiva favorecerá la supervivencia de «relojes» innatos que hacen coincidir el nacimiento de las crías con momentos en que las probabilidades de supervivencia son máximas, especialmente en las regiones templadas, donde las estaciones cambian abruptamente. Un ejemplo excelente lo proporciona el desove del grunión en las aguas del sur de California. Éste se produce en la marea viva de primavera, durante la Luna nueva o la Luna llena, y los peces desovan después de enterrar la mitad de sus cuerpos en la arena. Puesto que las mareas siguientes son cada vez menores, los huevos permanecen fuera del alcance de los predadores marinos. Los huevos se abren dos semanas más tarde, cuando vuelve la marea viva, justo a tiempo para llegar al mar con facilidad aprovechando la siguiente marea alta. Una falta de respeto por este ciclo de las mareas sería penalizada por los predadores, y los organismos provistos de relojes innatos que marchen al ritmo de las variaciones de las mareas prosperarán a expensas de los que carecen de ellos. Puesto que las fuerzas de marea son manifestaciones del mismo ciclo mensual de variaciones lunares que altera la fracción de la cara de la Luna que puede verse de noche por reflejo de la luz del Sol, hay varias maneras de establecer una sincronización con los ciclos de las mareas: sintiendo las fuerzas directamente, sintiendo las variaciones de la luz de la Luna o por variaciones de comportamiento en la región con grandes diferencias de marea.

Los animales sienten el cambio de las estaciones por una respuesta a la duración de la luz diurna. Hay ejemplos notables de la precisión de esta sensibilidad, que optimiza la fertilidad de las hembras para que coincida con

el equinoccio de primavera. Parece que la actividad de apareo se desencadena cuando la duración de la luz diurna alcanza un valor crítico. Los experimentos muestran que puede haber sólo dos fases: amor a la luz y amor en la oscuridad. En la primera fase, cuando la luz cae en el cuerpo estimula el crecimiento y la actividad; en la segunda fase estas cosas se inhiben. En días largos, más luz estimula respuestas bioquímicas más fuertes. Pero la situación no es siempre tan sencilla. Las criaturas pueden poner a cero sus relojes internos exponiéndolos a entornos artificiales. Ha habido mucha discusión entre biólogos sobre los papeles respectivos de los relojes internos, regulados genéticamente, y las influencias externas en la explicación de los ciclos biológicos. Parece que los seres vivos tienen unos ritmos basales, heredados a través de adaptaciones al entorno, que pueden ser corregidos por cambios en el entorno y transformados en nuevos ciclos.

El día y el año son las más simples de nuestras divisiones temporales. La longitud del día está determinada por el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta alrededor de su eje. El día sería mucho más largo si la Tierra rotara más lentamente, y las variaciones diurnas no existirían en absoluto si la Tierra no poseyera rotación. En ese caso, los seres vivos estarían divididos en tres poblaciones distintas: una en el lado oscuro, otra en el lado luminoso y una tercera en la zona crepuscular intermedia. El día no podría ser mucho más corto porque hay un límite a lo rápido que puede girar un cuerpo antes de que empiece a despedir a los objetos en su superficie y desintegrarse. De hecho, la longitud del día está alargándose muy lentamente, aproximadamente dos milésimas de segundo por siglo, debido a la atracción de la Luna. Durante los enormes períodos de tiempo necesarios para un cambio geológico o biológico destacable, este pequeño aumento se hace bastante importante. El día habría sido once horas más corto hace dos mil millones de años, cuando vivían las más antiguas bacterias fósiles conocidas. Se han encontrado pruebas directas de este cambio impresas en los seres vivos en algunos arrecifes coralinos de Las Bahamas. En el coral se depositan

bandas de crecimiento diario y anual (parecido a los anillos en los árboles), y contando cuántas bandas diarias hay en cada banda anual se puede determinar cuántos ciclos diarios había en un año. El crecimiento del coral contemporáneo muestra unas trescientas sesenta y cinco bandas por cada año, aproximadamente lo que se esperaba, mientras que los corales de hace 350 millones de años muestran unos cuatrocientos anillos diarios en cada banda anual, lo que indica que el día era entonces de sólo unas 21,9 horas. Este es casi exactamente el valor que esperaríamos en ese momento del pasado, dado el ritmo al que está cambiando la atracción de la Luna. Si extrapolamos hacia atrás hasta la formación de la Tierra, entonces la Tierra joven podría haber tenido días que durasen solamente unas 6 horas. Así pues, si la Luna no existiera, nuestro día sería probablemente de sólo un cuarto de su longitud actual. Esto también hubiera tenido consecuencias para el campo magnético de la Tierra. Con un día de sólo 6 horas, la rotación más rápida de partículas cargadas dentro de la Tierra produciría un campo terrestre unas tres veces más intenso que el actual. La sensibilidad magnética sería una adaptación más económica para los seres vivos en un mundo semejante. Pero los efectos ambientales de más largo alcance de un día más corto se seguirían de los vientos mucho más fuertes que azotarían la superficie en rotación del planeta. El grado de erosión por el viento y las olas sería muy grande. Habría presión selectiva hacia árboles más pequeños y para que las plantas desarrollaran hojas más pequeñas y más fuertes que fueran menos susceptibles de arrancar. Esto podría alterar el curso de la evolución de la atmósfera de la Tierra al retrasar la conversión de su primitiva atmósfera de dióxido de carbono en oxígeno por acción de la fotosíntesis.

El año está determinado por el tiempo que tarda la Tierra en completar una órbita alrededor del Sol. Este período de tiempo no es en modo alguno aleatorio. Las temperaturas y emisiones de energía de las estrellas estables están fijadas por las intensidades invariantes de las fuerzas de la Naturaleza.

En un planeta sólo puede haber actividad biológica si su temperatura superficial no es extrema. Demasiado calor, y las moléculas se fríen; demasiado frío, y se congelan; pero en medio, hay un rango de temperaturas en el que pueden multiplicarse y crecer en complejidad. El estrecho rango dentro del cual el agua es líquida puede ser muy bien el óptimo para la evolución espontánea de la vida. El agua ofrece un ambiente maravilloso para la evolución de la química compleja porque aumenta tanto la movilidad como la acumulación de grandes concentraciones de moléculas.

Estas limitaciones a la temperatura garantizan que los seres vivos deben encontrarse en planetas que no están demasiado cerca, ni demasiado lejos de la estrella alrededor de la cual orbitan. Estarán en una «zona habitable» alrededor de una estrella central de mediana edad, de la que el Sol es un ejemplo típico. Dichas órbitas deben estar necesariamente muy cerca de ser circulares si queremos que estos planetas permanezcan en la zona habitable a lo largo de sus viajes orbitales. Si se mueven en órbitas ovales muy excéntricas, como las de los cometas que periódicamente pasan cerca de nosotros, experimentarán alternativamente condiciones de extremo frío e intenso calor que hacen poco probable la evolución de la complejidad y la vida. La ley de gravitación fija el tiempo que tardará un planeta en completar su órbita si se conoce su distancia a la estrella madre. Los planetas que son habitables tienen así la longitud de su «año» firmemente determinada por las constantes inalterables de la Naturaleza.

Estas consideraciones nos muestran que la vida que tiene su base en planetas se encontrará en un ambiente periódico. Además, los ciclos de cambio introducidos por su rotación, y por su movimiento alrededor de su estrella madre, no serán distintos de los que caracterizan nuestra propia situación, porque todos están fuertemente ligados a las condiciones necesarias para el mantenimiento de un ambiente habitable constante. Las

adaptaciones al cambio periódico serán adaptaciones que debería compartir toda la vida inteligente[27].

Se puede especular sobre qué aspectos del mundo habrían dejado la impronta más profunda en nuestra común visión del mundo en la antigüedad primitiva. Existe la clara división entre la Tierra y el cielo, separados por el horizonte; la atracción de la gravedad de la Tierra orienta «arriba» y «abajo», donde quiera que vayamos. Estas experiencias son invariables, pero otras, como los ciclos de luz y oscuridad, son periódicas. El Sol domina las horas del día; es la fuente de luz y calor. Por la noche, su papel es asumido por la Luna y las estrellas, que se extienden por el cielo en la banda difusa que llamamos Vía Láctea. Todos los seres conscientes en planetas habitables en órbita en torno a estrellas estables estarán bajo influencias similares. Dioses-Sol y diosas-Luna son los objetos de culto más extendidos en la historia humana; su veneración muy bien puede extenderse mucho más allá de los confines de nuestro sistema solar.

El imperio del Sol. Las razones de las estaciones

Yo leo buena parte de la noche, y en invierno me voy al sur.
T. S. ELLIOT,
La tierra baldía

Cuando la Tierra hace su circuito anual alrededor del Sol describe una órbita con forma elíptica. Su máxima distancia del Sol es 1,017 veces la distancia media, y su mínima distancia es sólo 0,983 veces la media. Esta ligera desviación de un círculo perfecto produce una variación anual de aproximadamente un 7 por 100 en el flujo de energía que la superficie de la

[27] Si miramos en nuestro sistema solar, encontramos que los planetas tienen «días» cuya longitud varía entre unas diez horas (Júpiter y Saturno) y unos 243 días terrestres (Venus), y «años» entre un sexto (Mercurio) y 248 años terrestres (Plutón); véase Tabla 4.1.

Tierra recibe del Sol. La cercanía de la órbita de la Tierra a un círculo tiene una importancia evidente. En el caso de Marte, la variación en el calentamiento solar es un sorprendente 90 por 100. Tales variaciones drásticas presentan desafíos importantes para los poderes adaptativos de los organismos.

Pese a lo que la mayoría de la gente espera, la pequeña variación anual en la distancia de la Tierra al Sol tiene poco o nada que ver con los cambios estacionales en el clima de la Tierra. ¿Cómo podría tenerlo, cuando los veranos australianos coinciden con los inviernos europeos? Si dividimos la órbita elíptica de la Tierra en cuatro cuadrantes, podemos ver que, debido a que pasa más tiempo en los cuadrantes en los que está más lejos del Sol, recibe de hecho el mismo flujo de energía solar mientras está atravesando cada uno de los cuatro cuadrantes. Esto es una consecuencia de la ley de la inversa del cuadrado para la gravitación y para la iluminación.

La clave de las variaciones estacionales de la Tierra, y de toda la diversidad que deriva de ellas, es un pequeño accidente de su formación: el hecho de que su eje de rotación está inclinado con respecto al plano de su órbita alrededor del Sol. Si usted imagina la Tierra en órbita alrededor del Sol en la superficie de una mesa, entonces el tablero de la mesa especifica el plano de la órbita de la Tierra. Este plano se denomina la «eclíptica». Al tiempo que la Tierra órbita alrededor del Sol, rota alrededor de su eje polar cada 23 horas y 56 minutos, pero el eje polar no es perpendicular a la eclíptica: está inclinado con respecto a la perpendicular un ángulo de 23,5 grados.

Es esta modesta inclinación la que hace la superficie de la Tierra un lugar tan diverso. La Tierra mantiene su orientación con respecto a las estrellas lejanas mientras órbita alrededor del Sol, de modo que su oblicuidad asegura que los diferentes hemisferios reciben diferentes flujos de energía solar. Dos paralelos, conocidos como los Trópicos de Cáncer y de Capricornio, tienen latitudes iguales a 23,5 grados norte y sur respectivamente; entre dichas latitudes, la duración de la luz del día apenas varía, y hay un día en el año en

el que el Sol está directamente en la vertical. Por el contrario, dentro de los dos Círculos Polares localizados a latitudes de 66,5 grados norte y sur, hay enormes variaciones en horas de luz diurna: el Sol no sale en absoluto durante parte del invierno y no se pone durante parte del verano («la tierra del Sol de medianoche»). En las zonas templadas, entre los trópicos y los círculos polares, el Sol se eleva mucho más en el cielo durante el verano que durante el invierno; en consecuencia, las horas de luz diurna en verano son significativamente mayores y las temperaturas son más altas (Figura 4.1). Por el contrario, en los Trópicos hay poca variación de temperatura entre las estaciones. En su lugar, éstas están caracterizadas por una alternancia de períodos húmedos y secos, con sus variaciones en la vida de plantas e insectos, y por las enfermedades asociadas que siguen a los cambios de humedad.

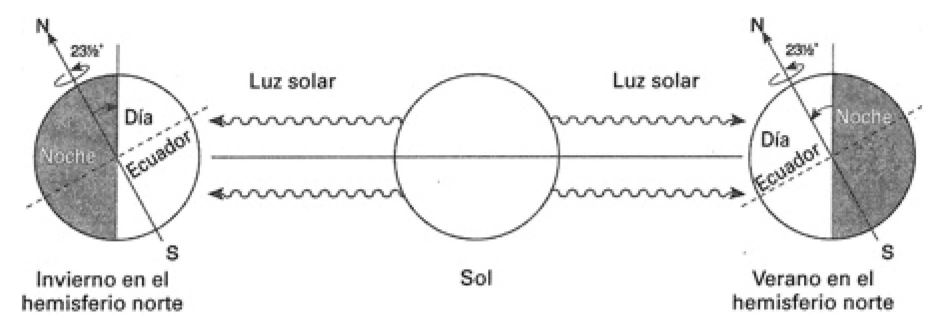


Figura 4.1. La razón de las estaciones: la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol (no dibujado a escala).

La Tierra habría sido un lugar más aburrido si el eje de rotación no estuviera inclinado respecto a la perpendicular al plano de la órbita. Esto, junto con otras propiedades de la Tierra, puede verse en el contexto de los demás planetas en la Tabla 4.1. Si no estuviera inclinada, no habría estaciones. El Sol saldría cada mañana y se pondría cada tarde después de seguir el mismo camino diario en el cielo. Las horas de oscuridad y de luz serían iguales en

todas partes; el clima sería estacionario; los vientos más moderados, y, sin estaciones, las zonas climáticas estarían abruptamente definidas sólo por la latitud. La flora y la fauna serían muy especializadas porque cada especie ocuparía ambientes particulares invariables. En el capítulo anterior vimos cómo el clima puede influir en los tamaños de los seres vivos. Como resultado de ello, en la Tierra hay tendencias importantes en el tamaño y la diversidad de los seres vivos conforme nos movemos desde los ambientes estables de las regiones ecuatoriales a los caprichos de los extremos polares. Toda esta variación es una consecuencia de la inclinación del eje de rotación de la Tierra. Sin ella, la mezcla de criaturas de diferentes tamaños no tendría ninguna restricción climática y la ecología de la Tierra sería muy diferente.

	Mercurio	Venus	Tierra	Luna	Marte	Júpiter	Saturno	Urano	Neptuno	Plutón
Distancia al Sol (10^6 km)	57,9	108,2	149,6	149,6	227,9	778,3	1427	2870	4497	5900
Período orbital (días)	88	224,7	365,3	27,3	687	11,87	29,46	84,01	164,79	247,69
Período de rotación axial (días)	58,64	243,0 retrógrado	0,997	27,32	1.026	0,410	0,444	0,718 retrógrado	0,768	6,387
Inclinación del eje de rotación	0,0°	177,3°	23,5°	6,7°	24,0°	3,1°	26,7°	97,9°	29,6°	94°
Radio ecuatorial (10^3 km)	2,439	6,052	6,378	1,738	3,394	71,4	60,0	25,6	24,3	1,18
Masa (10^{24} km)	0,330	4,87	5,98	0,0735	0,641	1900	569	86,8	102	0,014
Gravedad en la superficie (metros por segundo^2)	3,7	8,9	9,8	1,6	3,7	24,8	10,6	8,9	11,6	0,4
Temperatura superficial media (ºC)	170	460	15	1	–50	–143	–195	–201	–220	–205 a –165
Componentes principales de la atmósfera	He, Na, O	CO_2	N_2, O_2	Ne, Ar, H_2, He	CO_2	H_2, He, CH_4	H_2, He, CH_4	H_2, He	H_2, He	CH_4, ?N_2, ?CO

TABLA 4.1 Algunos datos de los planetas y de la luna. «Días» son aquí días solares de la Tierra y «años» son años terrestres. Los planetas exteriores gigantes (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno) son fluidos hasta profundidades importantes y no tienen una superficie bien definida. Los valores de sus temperaturas en superficie, gravedades en superficie y composiciones están especificados para una capa de la atmósfera en donde la presión es igual a la presión atmosférica terrestre al nivel del mar.

Por el contrario, si el eje de la Tierra estuviera inclinado mucho más de lo que está, entonces las condiciones se habrían hecho mucho más hostiles. Las variaciones estacionales más extremas ocurrirían para una inclinación de 90 grados, en cuyo caso el eje de rotación de la Tierra yacería en el plano de la rotación orbital[28]. Los cambios estacionales serían mucho más abruptos y extremos. La superficie de la Tierra oscilaría abruptamente entre veranos tropicales e inviernos árticos. Extensas capas de hielo se formarían y fundirían cada año, lo que llevaría a enormes variaciones en el nivel del mar. Si la inclinación de la Tierra fuera de 90 grados, la fusión de los hielos polares produciría incrementos en el nivel del mar superiores a 30 metros cada 6 meses. Las masas de tierra continentales se reducirían en tamaño y el área del planeta disponible para la evolución de la vida se reduciría de forma significativa. Las formas de vida tendrían que tener una movilidad extraordinaria para resistir los cambios estacionales. Todos los animales necesitarían ámbitos mayores y serían mucho más susceptibles a la extinción si repentinos cambios geológicos les impidieran migrar a climas más cálidos. Las velocidades del viento serían mucho mayores, las tormentas más fuertes y más abundantes. Los Círculos Polares abarcarían una parte mucho mayor de la superficie de la Tierra y los animales pequeños encontrarían sus hábitats reducidos y más poblados por competidores. De hecho, la Tierra sería un lugar más pequeño y menos hospitalario para los seres vivos. Sólo una pequeña parte de su superficie estaría durante largos períodos a una temperatura favorable para la vida. Y una parte aún mucho menor estaría dentro del rango de variación estacional al que podría seguir el paso el proceso de adaptación evolutiva.

En la época Victoriana era habitual que científicos y teólogos de cierta tendencia escribieran obras apologéticas que exponían una maravillosa

[28] Ésta es una situación similar a la del planeta Urano, cuyo eje de rotación está inclinado 98 grados hacia su plano orbital. Esta situación extrema quizá sea el resultado de un impacto de otro cuerpo muy poco después de formarse el sistema solar. [El hecho de que el ángulo de inclinación sea mayor de 90 grados significa que la rotación es retrógrada, es decir, en sentido contrario al del movimiento orbital *(N. del t.)*].

colección de características manifiestas en la Naturaleza, sin las que la vida humana sería insoportable, si no imposible. Estas características del mundo eran presentadas invariablemente como prueba convincente de un diseño benevolente en el corazón de la Naturaleza, del que nosotros éramos los principales beneficiarios. Las características del mundo natural favorables para la vida eran presentadas como algo tan inusual y esencial que sólo podrían haber aparecido gracias al propósito de un gran diseñador. Así, un argumento a favor de la existencia de Dios se apoyaba haciendo énfasis en la milagrosa abundancia de circunstancias favorables al mantenimiento de la vida humana. Este estilo de argumentación generó toda una subdisciplina de «teología natural», que fue especialmente dominante en Inglaterra y se ganó el apoyo de muchos científicos famosos. No es sorprendente que la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto a su plano orbital fuera una de las características resaltadas por los defensores de estas teorías del diseño. Deberíamos señalar que no pretendemos reiterar argumentos como ésos. Nuestra argumentación se dirige en dirección opuesta. Más que inferir algo metafísico a partir de la forma de los movimientos celestes, o concluir que han sido establecidos para permitir que exista la vida, queremos mostrar cómo las disposiciones celestes han influido inevitablemente en las formas de vida que surgen, evolucionan y se extienden en la Tierra. Aunque cambios en algunas de estas características del Sistema Solar harían imposible la vida en la Tierra (especialmente si los cambios fueran grandes), otros no lo harían. La vida seguiría apareciendo en estas circunstancias alteradas y mostraría las adaptaciones apropiadas a ellas[29].

---

[29] Recientemente, el cosmólogo Edward Harrison, de la Universidad de Massachusetts, ha propuesto una idea muy especulativa. Las teorías cosmológicas del universo primitivo han revelado que, en principio, es posible crear dentro de una región de espacio microscópicamente pequeña las condiciones requeridas para hacer que el espacio se expanda a una velocidad próxima a la de la luz y producir una región astronómicamente grande cuyos habitantes llamarían «universo observable». Aunque esta capacidad está mucho más allá de los sueños de nuestra tecnología actual, no es inconcebible que una civilización muy avanzada científicamente pudiera tener esta capacidad. Si es así, Harrison especula con que estaría en situación de determinar las condiciones locales que existen en las regiones que hace que se expanda espectacularmente. De hecho, parece que también podría influir en los valores efectivos de algunas de las constantes de la Naturaleza que definen su entorno. Por lo tanto, una civilización avanzada podría «ajustar» deliberadamente condiciones que favorezcan la vida en generaciones futuras de grandes miniuniversos en

La cercanía de la órbita de la Tierra a la circularidad significa que su inclinación domina las variaciones anuales en el clima. Si la órbita estuviera lejos de la circularidad, éste ya no sería el caso. Un ejemplo interesante de ello es Marte, que tiene un período de rotación que hace su día de duración similar al de la Tierra (24 horas 37 minutos). Su eje de rotación está inclinado 24 grados, un ángulo muy similar al de la Tierra (aunque varía entre 16 y 35 grados durante un período de 160 000 años). Sin embargo, la variación climática de Marte es drásticamente mayor que la de la Tierra, simplemente porque está dominada por la variación de la energía solar que recibe a lo largo del largo «año» marciano. Además, sin océanos que actúen como un sumidero para estos cambios de temperatura, y con enormes variaciones en la topografía de su superficie, sus variaciones climáticas son extremas.

El grado de inclinación de la Tierra es un término medio feliz. No podemos concluir, como los teólogos naturales de antaño, que esta inclinación sea óptima —que vivimos «en el mejor de los mundos posibles»— o que la vida no podría haber evolucionado en la Tierra si su inclinación fuera significativamente diferente (aunque muy bien podría ser cierto). En su lugar, ilustramos cómo el ritmo de las estaciones y las variaciones climáticas en la Tierra, que han modelado tantos caminos de desarrollo humano y animal, guardan la impronta de la estructura del Sistema Solar.

Planetas extrasolares. Un caso de prejuicio espacial

Que Dios me ayude en mi búsqueda de la verdad y me proteja de quienes creen que la han encontrado.

Antigua oración inglesa

expansión. Ellos seguirían el ejemplo de las condiciones fortuitas que, como habían descubierto inicialmente, aseguraban su propia existencia.

Hasta 1995 no podíamos hacer otra cosa que preguntamos si las propiedades singulares de nuestro Sistema Solar que han hecho posible la vida y han modelado nuestra perspectiva del Universo eran fortuitas o no. Ciertamente parecían especiales, pero con una única muestra no había mucho más que decir: podría haber sido que los sistemas planetarios se formaron solamente cuando ocurrió alguna rara explosión cataclísmica, o podría ser que aparezcan de forma natural cuando quiera que se forma una estrella como el Sol. Entonces, de forma más bien repentina, todo cambió. El 5 de octubre de 1995, Michel Mayor y Didier Queloz del Observatorio de Ginebra, anunciaron la primera detección de un planeta fuera de nuestro Sistema Solar. Fue detectado en una órbita de 4,23077 días terrestres alrededor de la estrella 51 Pegasi. Su masa era similar a la del planeta Júpiter, unas mil veces mayor que la de la Tierra. Tan sólo una semana más tarde, Geoff Marcy y Paul Butler, entonces en la Universidad Estatal de San Francisco, confirmaron su presencia y lanzaron la carrera para detectar un buen número de otros planetas. Hoy la cuenta pasa de 130, y el descubrimiento de uno nuevo ni siquiera aparece ahora en los periódicos a menos que haya algo especial sobre el planeta o su órbita.

Conforme ha aumentado el catálogo de planetas extrasolares hemos aprendido varias cosas importantes y ligeramente confusas sobre los planetas. Es evidente que la formación de planetas es un proceso general en el Universo. A este respecto nuestro propio planeta no es un caso especial. Pero, a medida que el número de planetas extrasolares crecía en el catálogo, empezamos a ver hasta qué punto nuestro Sistema Solar es distinto. De los planetas conocidos, sólo 14 están en sistemas planetarios con más de un planeta. Once de ellos muestran dos planetas en órbita y dos de ellos muestran tres. Es importante reconocer que quizá éste no sea un inventario completo de los planetas, ni siquiera en dichos sistemas, porque la técnica observacional sólo es sensible para detectar planetas gigantes como Júpiter. Los astrónomos registran el «bamboleo» de la posición de la estrella que

provocan los planetas en órbita en torno a ella. Los planetas grandes producen bamboleos mayores. Estos «jupíteres» son grandes bolas de hidrógeno líquido y gaseoso sin superficie sólida. No son lugares donde encontremos formas de vida convencionales. Sin embargo, pueden perfectamente poseer sistemas de pequeñas lunas que sean sólidas como la Tierra.

Cuando examinamos las órbitas de dichos planetas hacemos el descubrimiento más interesante de todos. Todos los planetas que están muy cerca de su estrella madre están en órbitas casi circulares. Esto es lo que cabría esperar: las fuerzas gravitatorias ejercidas sobre los planetas por sus estrellas madre los obligan a órbitas circulares. Lo que no esperábamos, sin embargo, era encontrar planetas gaseosos gigantes en órbitas tan próximas a su estrella madre. No sabemos cómo pudieron formarse tan cerca de su estrella, de modo que quizá se formaron más lejos y migraron al interior a medida que el sistema envejeció. Pero no es éste el único enigma. Conforme nos alejamos, encontramos que las órbitas tienen formas ovaladas extraordinariamente excéntricas. Esto está en abierto contraste con la situación en nuestro Sistema Solar en donde las órbitas son casi circulares.

Este extraño estado de cosas puede estar diciéndonos algo sobre lo que se necesita para que la vida evolucione. Si los planetas se mueven en órbitas circulares, sienten las mismas condiciones climáticas promedio durante todo el año orbital. Pero si sus órbitas son muy excéntricas, se achicharrarán cuando estén cerca de la estrella y luego se congelarán cuando su órbita los aleje. Hay una enorme variación climática a lo largo de su año, y cualquier superficie acuática se congelará y se derretirá (incluso hervirá) con notable regularidad. Éste podría ser un ambiente demasiado desafiante para que la vida pueda poner un pie en la escala evolutiva. Alrededor de cada estrella hay una zona habitable dentro de la cual el agua puede existir en forma líquida en la superficie de un planeta en órbita. Las órbitas circulares permanecen dentro de la zona habitable a lo largo de toda la órbita; las

órbitas elípticas saldrán en general de la zona habitable. Por alguna razón, nuestro Sistema Solar tiene simples movimientos orbitales circulares. Uno de los planetas en órbita en este sistema se encuentra cómodamente en medio de la zona habitable, y en ese planeta es donde vivimos. Nuestro descubrimiento de muchos planetas extrasolares ha sido extrañamente ambiguo en su mensaje. Por un lado, estamos convencidos de que los planetas como Júpiter son comunes y esperamos encontrar con el tiempo que también lo sean los planetas y lunas sólidos del tamaño de la Tierra. Pero, por otro lado, hemos llegado a apreciar que el movimiento de la Tierra alrededor del Sol es especial. Con el tiempo seremos capaces de determinar aproximadamente las velocidades de rotación y los ángulos de inclinación de planetas similares a la Tierra. Entonces podremos juzgar en qué medida es realmente especial la situación terrestre, utilizando evidencia real en lugar de mera especulación.

Un puñado de polvo. La Tierra debajo

Las formaciones geológicas del globo ya señaladas se catalogan así: La Primaria, o inferior, consiste en rocas, huesos de mulos cubiertos de lodo, tuberías de gas, herramientas de minero, estatuas antiguas sin nariz, doblones españoles y ancestros. La Secundaria está compuesta básicamente de lombrices y topos. La Terciaria comprende vías de ferrocarril, pavimentos, hierba, serpientes, botas mohosas, botellas de cerveza, latas de tomate, ciudadanos borrachos, basura, anarquistas, perros que muerden y locos.

AMBROSE BIERCE

La geografía de la superficie y la geología subterránea de la Tierra contribuyen a su singularidad de formas sutiles que hacen posible nuestra propia existencia y nuestras pautas de comportamiento. La disposición de las masas continentales con respecto al eje de rotación es un ejemplo interesante (Figura 4.2). La difusión temprana de la influencia de la humanidad tras el desarrollo de la agricultura se logró con más facilidad en continentes situados a lo largo de líneas de clima estacional constante que sobre aquellas masas que cubrían toda la gama de variaciones climáticas. Eurasia se extiende sobre enormes distancias, de oeste a este, a lo largo de líneas de latitud constante, mientras que América se extiende de norte a sur. En consecuencia, es más difícil que plantas y animales se extiendan por América que a lo largo de Eurasia, debido a la adaptación adicional necesaria para vivir en un clima diferente. Una zona templada va desde las islas Británicas hasta China, y los animales domesticados y los cereales son universales a lo largo del continente euroasiático. Por el contrario, la región tropical que separa Norteamérica de Sudamérica fue suficiente para impedir la migración de animales y cultivos entre ellas. Si las líneas de temperatura constante, o la orientación de las masas continentales, estuvieran rotadas 90°, entonces la primera colonización y desarrollo de América habría sido muy diferente. La aparición de la agricultura en el Nuevo Mundo habría sido más rápida, y sus civilizaciones habrían madurado y se habrían dispersado más rápidamente que las del Viejo Mundo. Así, la geografía y la astronomía fijan el escenario para la evolución de la vida y la cultura. La difusión de plantas y animales va seguida de sus cultivadores y criadores. Con ellos va el lenguaje y las costumbres, el comercio y la influencia.



Figura 4.2. La orientación de los continentes en la historia geológica reciente ha facilitado la migración de cereales a través de Eurasia porque abarcaba zonas de latitud y clima similares. Lo contrario sucede en el caso en las Américas.

También la composición interna de la Tierra tiene profundas implicaciones para nosotros. Todos nuestros combustibles son gases, líquidos y sólidos fosilizados, extraídos del subsuelo. El petróleo y el gas se acumulan en lugares donde hay una capa de roca porosa extendida en una configuración particular bajo una capa impermeable. Por desgracia, no hay forma de predecir dónde están situados estos depósitos con una mera inspección de la superficie de la Tierra. Lo mismo sucede con los metales y otros minerales útiles: los depósitos superficiales de fácil acceso se agotaron hace tiempo, y se necesitan prospecciones profundas para localizar nuevas reservas. Si no

conseguimos localizar más suministros de metales y minerales particulares en el futuro, las sociedades industriales se apagarán poco a poco en ausencia de combustibles y materias primas para construir y fabricar. Una vez más, cuando se trata de especular sobre la probabilidad de extraterrestres, esto nos da pie para pensar. El desarrollo de la ciencia y la tecnología avanzada por parte de los habitantes de un planeta exige enormes suministros de minas metálicas y otros materiales especiales. La presencia de estos materiales influye también en el curso del desarrollo científico. Por ejemplo, la intensidad del campo magnético de un planeta determinará cuán vital es para los habitantes del planeta comprender el fenómeno del magnetismo cuando comiencen a desarrollarse; si hay mares que cubren la mayor parte de la superficie del planeta entre las masas de tierra habitables, entonces el estudio de la astronomía se hará vital para la navegación.

La producción de concentraciones de minas de metales pesados que son tan útiles técnicamente puede requerir que en el planeta exista un estado de cosas bastante especial: un estado de cosas que, en el Sistema Solar, sólo existe en la Tierra. La existencia de movimientos de larga duración en el interior de la Tierra y un ciclo de erosión que transporte compuestos metálicos solubles gracias al movimiento global del agua desempeñan un papel clave en este proceso. La superficie de la Tierra está dividida en varias áreas bastante rígidas, denominadas «placas»; hay muy poco movimiento en el interior de cada placa, pero los movimientos en los bordes de las placas son habituales y tienen consecuencias espectaculares: terremotos, volcanes, nuevas cadenas montañosas y fosas oceánicas.

La superficie de la Tierra posee varias características simples pero profundas, sin las cuales el desarrollo de la vida se habría inhibido o impedido. La división de la superficie de la Tierra entre agua (un 70 por 100) y tierra seca (un 30 por 100) ha desempeñado un papel clave al dictar las direcciones en que puede ir la evolución. Los organismos terrestres tienen bastantes ventajas sobre los organismos acuáticos porque son capaces de desarrollar

un abanico más amplio de sentidos. La mezcla de tierra y agua en la superficie de la Tierra indica que no está en equilibrio. Si lo estuviera, toda la tierra estaría cubierta de agua con una misma profundidad. En realidad, continuamente se están produciendo cambios, debidos a la erosión, deposición, movimiento de placas y actividad ígnea. Pero hay un equilibrio isostático aproximado, pues si el desequilibrio fuera demasiado grande, o hubiera mucha menos agua en la Tierra que la que hay ahora, habría enormes variaciones en la elevación de la tierra, y una fracción mucho mayor de ella sería inhabitable y climáticamente extrema.

La Tierra es muy diferente de cuerpos como la Luna o Marte, porque sobre casi toda su superficie actúa una fuerza gravitatoria neta muy similar. Esto se debe en parte a que mucha de su superficie está cubierta de agua, y en parte a que muy poco está a más de unos centenares de metros sobre el nivel del mar. En planetas donde no hay océanos vemos enormes variaciones en la topografía de su superficie. Los océanos de la Tierra y la atmósfera húmeda desempeñan un papel que reduce las modestas variaciones topográficas mediante el ciclo de la erosión por la lluvia, el viento y los ríos que continuamente mueven material del terreno alto al bajo. Este proceso continuo tiende a nivelar la superficie, pero periódicamente es superado por la actividad de elevación de montañas como resultado de movimientos de las placas. La altura máxima que pueden alcanzar las montañas está determinada por la intensidad de las fuerzas intermoleculares, pero el espesor y la profundidad de las cortezas continentales y oceánicas por debajo de ellas parecen estar controlados por la necesidad de mantener un equilibrio global. Cómo ocurre esto y cuáles son los límites, todavía no se entiende por completo.

Igualmente crucial para la habitabilidad de la Tierra ha sido la evolución de su atmósfera. Durante la mitad de su tiempo de vida ha tenido una composición reductora o neutra que podía disolver materiales ferrosos, y durante la otra mitad ha tenido una composición oxidante que podía

transportar grandes cantidades de metales no ferrosos. Combinemos estos requisitos con la necesidad de grandes masas de tierra, de modo que estos metales queden en una forma accesible cerca de la superficie durante miles de millones de años, y empezamos a ver que los planetas explotables tecnológicamente no van a ser abundantes. Además, con respecto a la existencia de materiales radiactivos, hemos sido los beneficiarios de otro capricho de los procesos geológicos que incluyeron tales materiales en la Tierra. El uranio natural está casi todo en forma del isótopo uranio-238. (Los isótopos son formas del mismo elemento en las que los núcleos atómicos tienen el mismo número de protones pero distinto número de neutrones). Esta forma de uranio no sostendrá reacciones en cadena. Si queremos obtener una bomba, o una reacción en cadena utilizable, es necesario extraer del uranio-238 las trazas de otra forma de uranio, el uranio-235, que puede sostener una reacción en cadena estable. Sin embargo, en el uranio que se da de forma natural no más del 0,3 por 100 está en forma de uranio-235; para conseguir una reacción en cadena se requiere al menos un 20 por 100 de uranio-235. (El denominado uranio «enriquecido» o «utilizable en armas» tiene un 90 por 100 de uranio-235). La baja abundancia relativa del isótopo 235 del uranio explica por qué los depósitos y minas de uranio no experimentan reacciones nucleares espontáneas que culminen en enormes explosiones[30]. Una abundancia de uranio-235 distribuido de forma utilizable,

---

[30] Existe un interesante ejemplo de un reactor nuclear natural que se dio en una mina en Oklo, en el estado africano de Gabón. En 1976 se descubrió una mina de uranio que contenía cantidades de dos isótopos de la tierra rara samario. En el samario en forma natural, la razón entre estos dos isótopos es normalmente de 9:10, pero en la muestra tomada en la mina de Oklo la razón se había reducido a sólo 1:50. Las condiciones del interior de la Tierra en el lugar de la mina habían conspirado, durante miles de millones de años, para producir un «reactor nuclear natural», que constantemente transformaba un isótopo en el otro. El reactor alcanzó el estado crítico por primera vez hace dos mil millones de años. De hecho, la transformación se basa en un equilibrio muy delicado entre las intensidades de las fuerzas de la Naturaleza. Los productos del reactor revelan que este equilibrio especial debe haber existido hace dos mil millones de años, como sabemos que lo hace hoy. En consecuencia los físicos pudieron poner restricciones muy fuertes a la posibilidad de que las fuerzas fuerte, débil y electromagnética de la Naturaleza hubieran cambiado muy lentamente durante miles de millones de años en lugar de permanecer constantes. En los últimos años la cuestión de si las constantes de la física son verdaderas constantes se ha convertido en tema de gran interés para físicos y astrónomos. Su constancia puede ser comprobada incluso en un tiempo muy anterior al reactor de Oklo comparando las pautas de absorción de la luz procedente de cuásares lejanos cuando atraviesa nubes de polvo en su camino desde el cuásar a nuestros telescopios. Estas observaciones nos permiten retroceder casi diez mil millones de años en el pasado para poner a prueba si las constantes que gobiernan la interacción entre materia y luz han permanecido constantes durante ese período de tiempo. Actualmente hay alguna prueba, a partir

pero segura, depende claramente en una secuencia de accidentes impredecibles en la composición y evolución geológica de un planeta. Podríamos especular aún más. Imaginemos que la Tierra estuviera sometida a un pequeño chaparrón de meteoros ricos en diamantes o metales preciosos como el oro. La economía del mundo se agitaría; con oro ahora tan abundante como el hierro, las reservas de oro de las principales naciones industriales caerían en picado en el mercado como si fueran chatarra.

La abundancia de elementos radioactivos en el interior de la Tierra desempeña un papel importante en su historia. Actúan como fuente de calor interno que debe disiparse desde la superficie del planeta. El ritmo de esta pérdida de calor determina cuánta parte del núcleo de la Tierra permanece sólida. Como vimos en el capítulo anterior, una esfera pequeña tiene una relación entre superficie y volumen mayor que una esfera grande. Así, los planetas como Mercurio y Marte, que son mucho más pequeños que la Tierra, tienen mucho menos calor interno acumulado, y con ello mucho menos magma y vulcanismo subterráneo. El calentamiento interno de la Tierra desempeña un papel principal en mantener la plasticidad del manto. Esto crea oportunidades para que se genere magma y suba a través de la corteza. Si la Tierra fuera más pequeña, sería más fácil extraer el calor generado por su radioactividad interna, una parte mayor del núcleo sería sólida y los volcanes serían más raros. Sin embargo, esta disminución en la frecuencia de las erupciones volcánicas estaría más que compensada por el impacto mucho mayor que tendrían las que ocurrieran. Una Tierra más pequeña tendría una atracción gravitatoria más débil en su superficie, lo que permitiría que el polvo y las cenizas volcánicas fueran expulsados a una altura mucho mayor en la atmósfera. Los efectos sobre el clima serían considerables; la luz del Sol quedaría apantallada y se formarían ácidos en la atmósfera superior por la condensación de gases volcánicos sulfurosos.

---

de dichas observaciones, de un aumento muy lento de unas seis partes por millón durante diez mil millones de años, pero se necesitarán algunos años más para que esto sea confirmado o refutado utilizando observaciones diferentes. Para una historia más completa, véase mi libro *Las constantes de la naturaleza.*

Un guijarro en el cielo. La Luna arriba

¡No sirve de nada decirme que hay una roca muerta en el cielo! Yo sé que no lo está.

D. H. LAWRENCE

La vista más impresionante en el cielo nocturno es la del creciente y el menguante lunar. La Luna es mucho más grande con respecto a la Tierra que cualquier otro satélite del Sistema Solar lo es comparado con su planeta mayor. Júpiter y Saturno son 317 y 95 veces más masivos que la Tierra, respectivamente, pero sus lunas más grandes no son mucho mayores que la nuestra. El gran tamaño de la Luna ha dejado su huella en nuestro pensamiento sobre el mundo. Desde los «asilos para lunáticos» hasta el «hombre en la Luna» vemos su influencia psicológica. Pero su influencia física directa sobre nosotros ha sido aún mayor. La Luna está muy cerca —a una distancia de sólo 60 veces el radio de la Tierra— y su tamaño relativamente grande significa que la Tierra y la Luna se comportan más bien como un planeta doble.

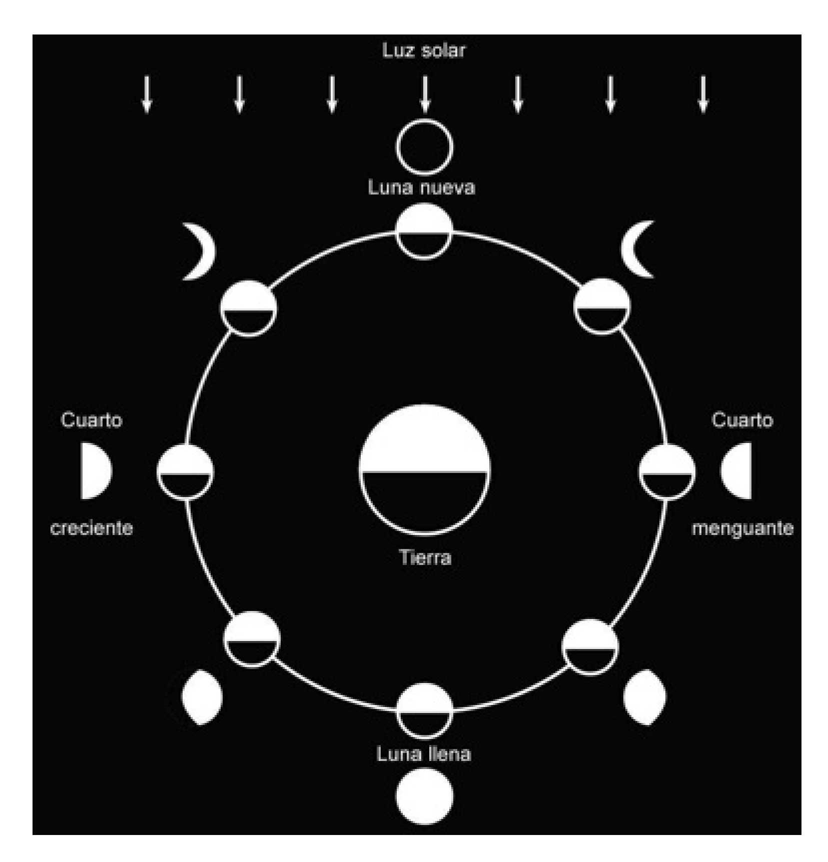


Figura 4.3. La Luna brilla sólo a la luz reflejada del Sol y por ello su apariencia en el cielo está determinada por su posición con respecto al Sol. La mitad de la Luna está siempre iluminada por el Sol, pero la parte que vemos iluminada desde la Tierra varía. Esta figura muestra lo que vemos en el cielo cuando la Luna recorre sus diversas fases.

Las influencias lunares a nuestro alrededor han dejado su huella en nuestros cuerpos por las presiones del tiempo. La doceava parte del año que llamamos «mes» es realmente una «luna»[31]: un período próximo al período de 27,32 días que la Luna tarda en dar una vuelta alrededor de la Tierra, con respecto a las lejanas estrellas fijas (Figura 4.3).

Durante este período que se denomina período sidéreo de la Luna, la Tierra también se habrá movido en su órbita alrededor del Sol, y la Luna tendrá que moverse una distancia adicional (unos 27 grados) para completar su

[31] El autor hace un juego de palabras entre *month* (mes) y *moonth* (por *moon* = luna) intraducibie en castellano. *(N. del t).*

ciclo de fases con respecto al Sol. De hecho, teniendo esto en cuenta, el ciclo mensual entero de las fases lunares es de 29,53 días.

La presencia de la Luna ejerce una atracción sobre la Tierra que es más fuerte en el lado de la Tierra que está más próximo a la Luna. Esto crea una variación de marea en las alturas de los océanos, que varía mensualmente con el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra. Hay indicios sorprendentes de que esta variación ha dejado su huella de diversas maneras en las pautas de conducta de los seres vivos. En el caso de criaturas que viven en aguas someras, o son anfibias, la variación de las mareas proporciona una variación importante, y la adaptación a ella será beneficiosa. Las mujeres muestran un ciclo de producción de estrógenos de 28 días, que está próximo al período mensual lunar. Le llamamos «ciclo menstrual» —derivado de *menses,* o mes—. Muchos otros mamíferos tienen ciclos menstruales, con variaciones asociadas en temperatura corporal, y se ha encontrado que el tiempo de ovulación en los primates varía entre 25 y 35 días. No parece haber ninguna explicación simple para estas correlaciones entre las fases de la Luna y los ciclos menstruales. ¿Por qué la fertilidad humana debería reflejar el ciclo de las fases cambiantes de la Luna? Se ha sugerido que podría ser un vestigio de una etapa anterior de nuestra evolución, cuando nuestros ancestros vivían en el mar y estaban sometidos de alguna manera al ciclo de las mareas. Otra propuesta es que estos ciclos son ligeras adaptaciones del período en que los humanos eran cazadores-recolectores primitivos. En tales circunstancias, la luz del día es un bien escaso y la Luna llena debe explotarse al máximo. El período oscuro cuando la Luna había desaparecido podría dedicarse de forma natural a la actividad de apareamiento, y entonces habría adaptación a un ciclo corporal con una periodicidad química que reflejaría la variación lunar. Pero sigue siendo un misterio cómo una variación suficiente robusta se podría preservar de forma tan universal hasta el presente, y en tantas especies.

La conciencia de las estrellas por parte de la humanidad, y de los cambios periódicos en las apariencias del Sol y la Luna, estaba ya bien arraigada en el alba de la historia registrada. Mucho antes de que se llevaran registros escritos de cualquier tipo, había una apreciación de cambios sistemáticos en los cielos. La visión más sorprendente debe haber sido la de los cambios mensuales en la forma de la Luna. Uno de los artefactos humanos más tempranos que ofrece prueba de una actividad de recuento quizá haya sido un intento de registrar el ciclo lunar. Hace unos treinta años se encontró en Ishango, junto al lago Eduardo en la frontera del actual Zaire, un mango de hueso que originalmente había estado unido a una herramienta para grabar de cuarzo. Fue fabricado en torno al 9000 a. C., tallado por un miembro de una sociedad que vivía cazando y pescando en las orillas del lago hasta que finalmente fue destruida por una erupción volcánica. El mango de hueso petrificado es aproximadamente cilíndrico y muestra tres hileras de marcas, como se muestra en la Figura 4.4. La forma en que están agrupadas las marcas ha alimentado muchas especulaciones. Las dos hileras superiores suman 60. La tercera hilera suma 48. Hay trazas de duplicación, con agrupamientos contiguos de 10 y 5, 8 y 4, y 6 y 3 marcas. Además, la primera hilera muestra la secuencia 9, 19, 21, 11; es decir 10 - 1, 20 - 1, 20 + 1 y 10 + 1. Una especulación dice que el 60 representa 2 meses lunares de días, y que las marcas eran un calendario. La hilera que totaliza 48 es anómala, pero se ha dicho que el análisis microscópico revela otras marcas en esta sección del hueso, aunque igual de probable es que la línea esté incompleta: de hecho, cabe esperar que si el propietario murió, o el hueso se perdió, eso habría ocurrido con más probabilidad en un momento que no coincidiera con un múltiplo entero de meses.

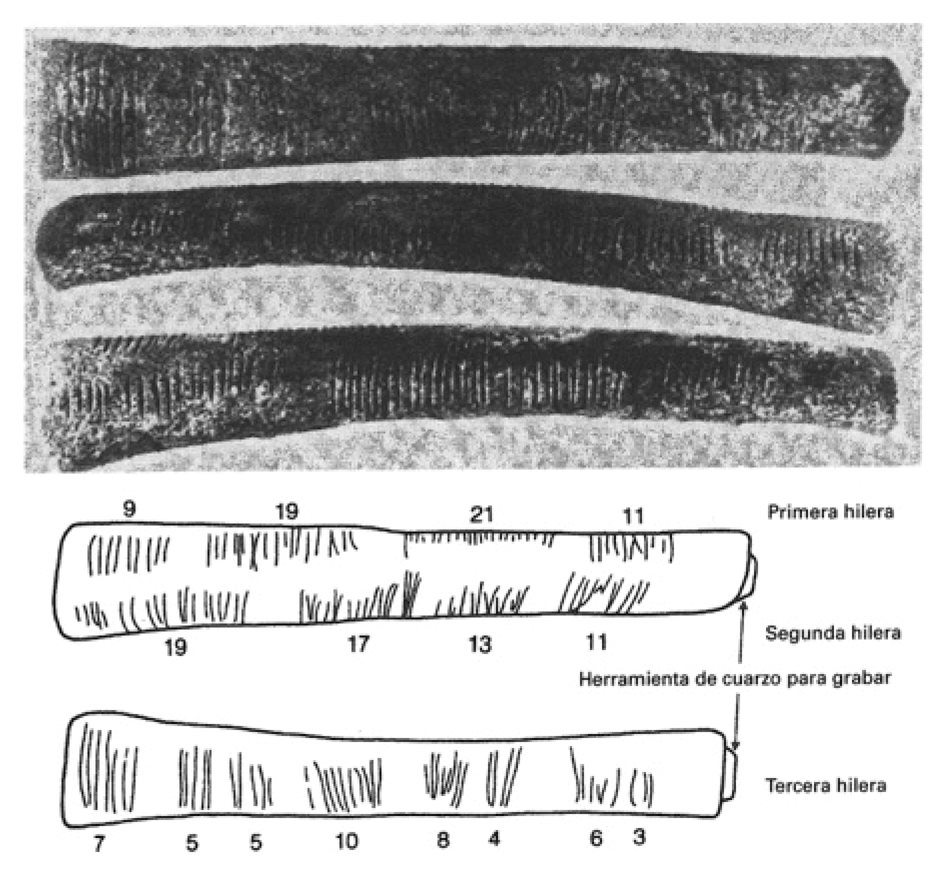


Figura 4.4. Fotografías de los lados de la herramienta de hueso mesolítica encontrada en Ishango. Tiene tres hileras de marcas grabadas. Las marcas están indicadas en el diagrama inferior.

Sabemos que un método aproximado de representar cambios estacionales sería importante probablemente para el pueblo Ishango, porque los cambios estacionales en su región les obligaban a dejar la orilla del lago y migrar a las montañas cuando llegaban las lluvias y crecía el nivel del agua.

Un artefacto de este tipo mucho más antiguo lo proporciona un fragmento de hueso de 30 000 años de edad encontrado en los primeros años del siglo XX en Blanchard, en la región de Dordoña en Francia. Contiene una secuencia de 69 muescas en un lado, dispuestas a lo largo de una línea curva que serpentea de un lado a otro cinco veces, como se muestra en la Figura 4.5.

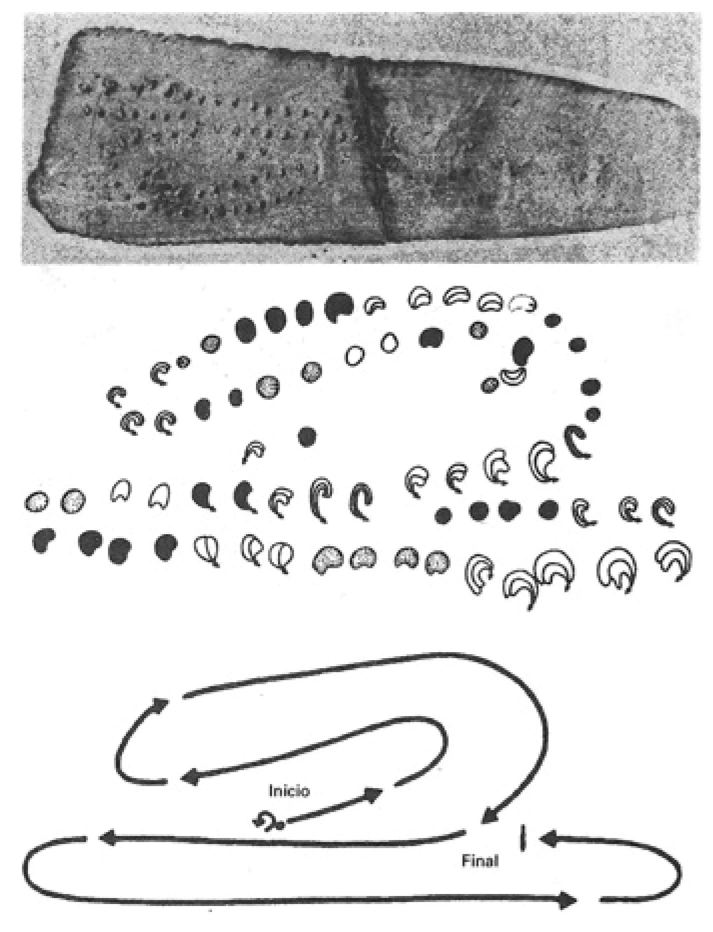


Figura 4.5. Placa ósea grabada de 30 000 años de antigüedad encontrada en Blanchard en la Dordoña, junto con un esquema de la pauta de las marcas, que se parecen a las fases lunares, y la guía propuesta por Alexander Marshack para el orden a seguir. Empieza con las dos marcas próximas al centro que marca el día del último creciente lunar visible y el primer día de la Luna nueva invisible. Subiendo hacia la derecha y posteriormente bajando a la izquierda, se llega a la Luna llena con el primer grupo de cuatro trazos en la segunda vuelta. Cuando la línea vuelve hacia la derecha, los cuatro puntos negros en la tercera curva coinciden con la siguiente Luna nueva. Con el cuarto giro, en la parte inferior izquierda, la cuenta llega a otra Luna llena, y la marca final en un grupo de cinco marcas está próxima a la quinta y última curva.

Cuando se examinó al microscopio, se encontró que las marcas caían en grupos y que habían sido hechas por 24 tipos diferentes de puntadas de herramienta, quizá incluso con herramientas diferentes. Ésta parece ser una forma laboriosa de hacer unas figuras decorativas, y parece más probable que dichas marcas constituyan una forma de notación. Además, las formas de creciente de las marcas recuerdan las fases de la Luna. El arqueólogo Alexander Marshack cree que esto es lo que nos están diciendo las marcas, siempre que las leamos en el orden correcto, partiendo de las dos marcas en el centro que señalaban el día de la última medialuna visible y la desaparición de la Luna nueva. Conforme se siguen las marcas a lo largo de la curva, se alcanza la Luna llena en el primer grupo de cuatro marcas similares; a continuación, las Lunas llena y nueva están marcadas por grupos de cuatro puntos, y la figura entera se interpreta como un registro de días en términos de la apariencia de la Luna durante un período de dos meses y cuarto.

En el capítulo anterior vimos cómo sensibilidades concretas al entorno natural habrían sido ventajosas para una primitiva especie homínida que viviera en hábitats de sabana tropical hace medio millón de años. Podríamos preguntamos si una respuesta a cualquier aspecto de los cielos les ofrecería alguna ventaja, lo que podría dar lugar a una adaptación. En este mundo primitivo la noche estaba llena de peligros: era el único momento en que los homínidos no podían utilizar su vista aguda y su plan estratégico para sorprender a animales más fuertes y más rápidos con un mejor sentido del olfato. Es fácil ver por qué tendemos a tener miedo de la oscuridad. Es más probable que las desgracias ocurrieran por la noche, y por ello las ocasiones en que sucedieran serían asociadas de manera natural con la forma de la Luna. La Luna y las estrellas también serían visibles cuando los grupos se reunieran en torno a hogueras para hablar de sus aventuras de caza y hacer planes para el día siguiente. En tales circunstancias, alertas a la apariencia de pautas en el cielo, existe una tendencia a que las luces en el cielo lleguen

a relacionarse con la narración de historias, actos de heroísmo, lugares excitantes y sucesos imaginados por encima del horizonte.

Tinieblas a mediodía. Eclipses

Si las estrellas aparecieran una noche cada mil años, ¡cómo creerían y adorarían los hombres, y conservarían para muchas generaciones el recuerdo de la ciudad de Dios!
RALPH W. EMERSON

Rodeados por el resplandor nocturno de la luz artificial que baña nuestras ciudades, vemos pocas estrellas. Para los antiguos, especialmente aquellos que vivían bajo cielos claros, o en el aire rarificado de las regiones montañosas, las cosas eran muy diferentes. El espectáculo de miles de estrellas brillantes habría sido lo más impresionante que veían en su vida. No es sorprendente que crecieran mitos e historias de creación en los que las pautas de luz celeste desempeñaban un papel destacado. Con el tiempo, la sorpresa daría paso a la familiaridad, sólo para ser reavivada ocasionalmente por cambios impredecibles en los cielos. A comienzos del siglo pasado, el filósofo George Santayana pronunció una famosa serie de conferencias en Estados Unidos sobre el tema de la belleza y la estética. Escogía la apariencia del cielo nocturno como ejemplo de lo que es atractivo para la mente humana: un nivel de dificultad delicadamente situado entre la complejidad insondable y la simplicidad monótona. El indicio de una pauta reta a la mente a reflexionar y buscar. Entonces, ¿qué pasaría si viéramos el cielo nocturno por primera vez? Las palabras de Emerson, que encabezan esta sección, imaginan las consecuencias espirituales de semejante despertar astral. Inspiraron al joven Isaac Asimov para escribir su famoso cuento *Anochecer* sobre los últimos días de la civilización en el planeta Saro. Ese mundo

disfrutaba de la luz de seis soles. Al menos uno de ellos estaba siempre en lo alto del cielo. La oscuridad natural era desconocida y, con ella, también lo eran las estrellas. Los habitantes habían evolucionado en un mundo de luz sin ningún condicionamiento psicológico por la oscuridad y con una fuerte susceptibilidad a la claustrofobia cuando eran privados de luz. Sus astrónomos estaban convencidos de la pequeñez del Universo. Incapaces de ver más allá de su propio sistema solar séxtuple, se contentaban con demostrar lo bien que podían entenderse sus complicados movimientos utilizando la misma ley de gravitación que tan bien funcionaba en la superficie de Saro. Estos racionalistas compartían su mundo con los románticos cultistas, que perpetuaban una «vieja sabiduría» que hablaba de un mundo de luz más allá del cielo y el advenimiento de la oscuridad que sería el fin del mundo. Muchos despreciaban a los cultistas como irracionalistas, pero otros veían sus creencias como una confusa tradición surgida de una pasada aparición de oscuridad y luces en el cielo, tiempo atrás. Las tensiones sociales aumentaron cuando los astrónomos predijeron que debía haber una luna oscura invisible en su sistema solar que solamente se haría visible cuando estuviera a punto de eclipsar a uno de sus soles. Su presencia era necesaria para explicar los complicados movimientos de los soles. Algunos astrónomos se dan cuenta de que la luna eclipsará al segundo sol del sistema en un momento en que será el único sol en el cielo. El eclipse será total. Se filtran noticias de esta predicción. Los disturbios aumentan cuando los cultistas agitan la fiebre escatológica; el eclipse comienza a morder el disco del sol solitario y termina siendo total. La oscuridad oculta el cielo y aparecen decenas de miles de estrellas brillantes, envolviendo al planeta en un dosel de luz estelar centelleante. Pues Saro no es un extraño en los aledaños escasamente poblados de una galaxia como la Vía Láctea, sino que se encuentra en el centro del denso corazón de un cúmulo estelar. Se desencadena el pánico y los disturbios civiles. Ahí termina la historia;

queda para el lector reflexionar sobre la revolución que está a punto de producirse.

Buscando paralelismos en la historia, podríamos comparar el impacto de la primera aparición de la oscuridad tachonada de estrellas en el mundo de ficción de Saro con las primeras respuestas humanas a un eclipse total de Sol por la Luna. Los eclipses antiguos son famosos por su influencia en los asuntos humanos. El eclipse total que ocurrió el 28 de mayo del año 585 a. C. fue tan espectacular e inesperado que puso fin a la guerra de cinco años entre los lidios y los medos. Sus registros nos dicen que en medio de la batalla «el día se convirtió en noche»; el combate se detuvo inmediatamente y se firmó un tratado de paz respaldado por matrimonios entre las familias reales. En marcado contraste, el eclipse de Luna del 27 de agosto del año 413 a. C. trajo un final muy diferente para la guerra del Peloponeso, entre los atenienses y los siracusanos. Los soldados atenienses estaban tan aterrorizados por el eclipse que se hicieron reacios a dejar Siracusa, como estaba planeado. Interpretando el eclipse como una mala profecía, su comandante retrasó la partida por un mes. El retraso entregó a todas sus fuerzas en manos de los siracusanos: fueron derrotados por completo y su comandante fue condenado a muerte.

Muchos siglos después, Cristóbal Colón explotó su conocimiento astronómico de un eclipse de Luna por la Tierra para obtener la ayuda de los jamaicanos después de que sus barcos dañados quedaron varados en su isla en 1503. Inicialmente intercambió baratijas por comida con los nativos, pero con el tiempo éstos se negaron a darle más y sus hombres se enfrentaban a morir de hambre. Su respuesta consistió en acordar una conferencia con los nativos la noche del 29 de febrero de 1504, momento en que empezaría un eclipse de Luna. Colón anunció que su Dios estaba disgustado por su falta de ayuda y que iba a eliminar la Luna como señal de su profundo disgusto. Cuando la sombra de la Tierra empezó a caer sobre la cara de la Luna los nativos accedieron rápidamente a darle todo lo que quisiera, siempre que les

devolviera la Luna. Colón les dijo que necesitaba ir y convencer a su Dios de que restaurara la pequeña luz del cielo. Tras retirarse con su reloj de arena durante el tiempo apropiado, volvió, justo a tiempo, para anunciar el perdón del Todopoderoso por sus pecados y la restauración de la Luna en el cielo. Inmediatamente después, el eclipse terminó. Colón ya no tuvo problemas en Jamaica; él y sus hombres fueron rescatados posteriormente y volvieron triunfantes a España.

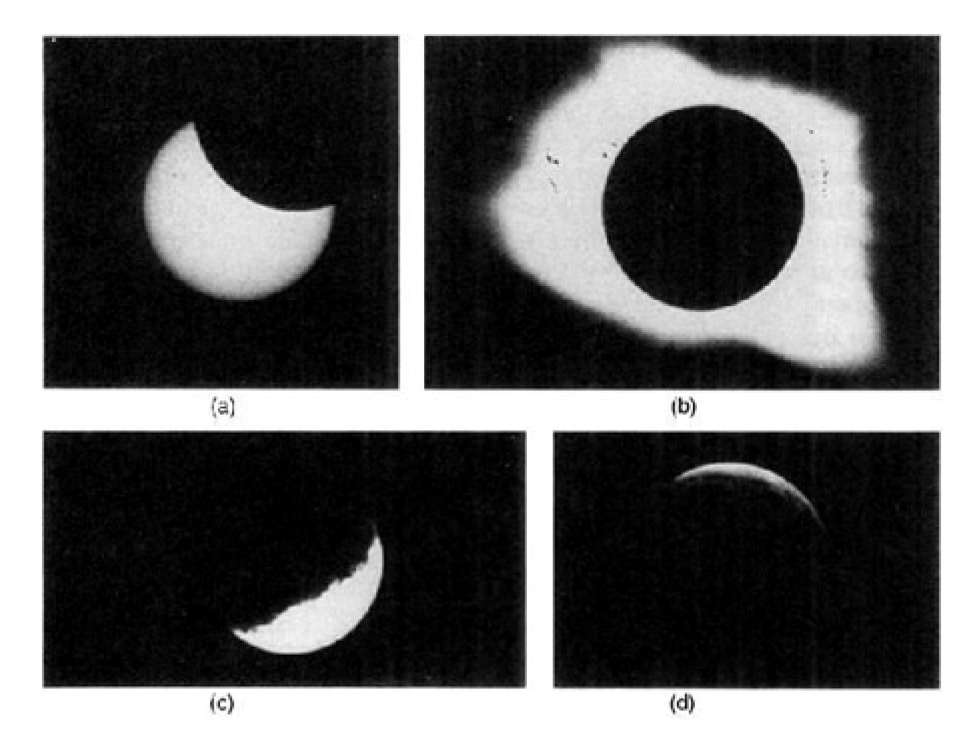


Figura 4.6. Eclipses solar y lunar: (a) un eclipse parcial de Sol en el que la Luna nueva ha interceptado parte de la superficie solar visible; (b) un eclipse total de Sol; (c) un eclipse parcial de la Luna en el que la sombra de la Tierra oculta casi dos tercios de la superficie visible de la Luna; (d) un eclipse casi total de Luna por la sombra de la Tierra.

Los eclipses son hechos notables. Su existencia ha influido en culturas de todo el mundo durante miles de años. Han encontrado su lugar en el arte, la teología, el folclore y la astrología. Su espectacularidad garantizaba que los

historiadores antiguos los registrasen invariablemente, y con frecuencia los interpretaban como profecías de gran trascendencia. Esto los hace útiles como medio de datar de forma muy precisa narraciones escritas. Por ejemplo, en el libro bíblico del profeta Amos, éste escribe (capítulo 8, versículo 9) de Nínive: «Y llegará el día, dijo el Señor, en que yo haré que el Sol descienda a mediodía y oscurecerá la Tierra en pleno día». El «día» en cuestión era el 15 de junio de 763 a. C., y también está registrado en las crónicas asirías tras ser observado en Nínive.

Los eclipses ocurren por un accidente de la Naturaleza (Figura 4.6). El diámetro verdadero del Sol es aproximadamente 400 veces mayor que el de la Luna; su distancia a la Tierra también es aproximadamente 400 veces mayor que la de la Luna. Estas enormes disparidades conspiran para hacer que los tamaños aparentes del Sol y la Luna en el cielo sean iguales. Como resultado, el paso de la Luna por delante del Sol puede cubrir por completo la cara del Sol y así se produce un eclipse total de Sol. Por comparación, si examinamos los otros planetas del Sistema Solar encontramos que sus lunas parecerán mucho más grandes que el Sol en sus cielos. En promedio, nuestra Luna parece ser sólo un poco más pequeña que el Sol cuando se ve desde la Tierra, pero la diferencia es suficientemente pequeña para ser superada por las variaciones en la distancia entre la Tierra y la Luna, de modo que también hay períodos en los que la cara de la Luna es ligeramente más grande que la del Sol. La situación está minuciosamente equilibrada: si la distancia a la Luna aumentara en un simple 8 por 100 (unos 29 000 kilómetros), entonces nunca se verían eclipses totales de Sol desde la Tierra[32]. Ahora bien, ya hemos explicado que la distancia entre la Tierra y la Luna está aumentando poco a poco en algunos centímetros por año. Dentro de quinientos millones de años, la Luna estará tan alejada que ya no habrá

[32] El otro único lugar en el Sistema Solar desde donde se vería un eclipse completo sería Prometeo, un satélite irregular de Saturno. Pero desde la superficie de Saturno, y por ello lejos del Sol, el eclipse de Sol abarcaría un área minúscula del cielo y tendría una duración muy breve.

eclipses totales de Sol. Vivimos en un tiempo propicio para los observadores de eclipses. Pero, como vamos a ver dentro de poco, el accidente fortuito de tiempo y espacio que nos permite ver eclipses totales tiene consecuencias de mayor alcance.

Los eclipses fueron siempre malas noticias para los antiguos. Incluso cuando culturas avanzadas comprendían por qué se producían, seguían atribuyéndoles un significado que estaba relacionado con asuntos humanos. La palabra eclipse deriva del griego *ekleipsis* que significa una «omisión» o un «abandono», y en muchas otras culturas hay residuos de una vieja imagen del Sol siendo consumido por una bestia salvaje durante un eclipse. En chino, eclipsar es *shih,* «comer», con el Sol siendo devorado —tradicionalmente por un dragón—. Pero para los astrónomos modernos los eclipses no son malas noticias. La coincidencia de que el Sol y la Luna tengan el mismo tamaño aparente en el cielo, a pesar de la enorme diferencia entre sus tamaños verdaderos, ha tenido la más profunda importancia para el progreso de nuestra comprensión del Universo. Antes de que veamos por qué, recordemos las muchas especulaciones sobre la inevitabilidad de que civilizaciones extraterrestres de larga vida se hagan científicamente avanzadas. Supongamos que la profunda y unificadora «Teoría de Todo» que están buscando los físicos modernos existe realmente. Supongamos incluso que las matemáticas son un lenguaje universal de la Naturaleza que es apropiado para expresar dicha Teoría de Todo. Así, cualquier entendimiento pleno de la Naturaleza, cualquier explotación profunda del potencial de la Naturaleza, debe llegar a través de un entendimiento de esas leyes matemáticas que rigen la marcha del Universo. Esta es, por supuesto, una filosofía reconfortante para quienes escuchan, o envían, señales extraterrestres. La búsqueda de señales procedentes de extraterrestres se basa en la creencia en la universalidad de las matemáticas y las leyes de la Naturaleza. Esto no significa que esperamos que los extraterrestres utilicen los mismos alfabetos, o sistemas de numeración, que nosotros. Pero

creemos que, en cualquier caso, ellos deben describir por algún medio las mismas conexiones lógicas que describen nuestros propios sistemas, y por ello serán capaces de traducir nuestra descripción a la suya —igual que podemos conversar sobre números con gentes de otras culturas haciendo una traducción—. Por esto es por lo que los mensajes que enviamos —con tantas esperanzas— al espacio utilizan longitudes de onda de la luz que tienen especial importancia para los físicos. La importancia de estas longitudes de onda debería ser apreciada por cualquiera cuyo conocimiento de la materia y la radiación le permita enviar o recibir señales de radio. Es interesante preguntarse cuán razonables son las hipótesis que hay detrás de estas grandes expectativas. Pero admitámoslas por ahora, porque lo que más nos interesa es otra hipótesis implícita: que las civilizaciones avanzadas, de inteligencia similar a la nuestra, serán capaces de deducir las leyes de la Naturaleza con la misma facilidad que nosotros. Tendemos a considerar que estamos en la media de la clasificación del IQ celeste, elevado, reconozcámoslo, por el Einstein ocasional que tanto se aparta del promedio (Figura 4.7). También tendemos a considerar «avanzada» como un elogio generalizado: si saben mucho sobre algo, sabrán mucho sobre todo.

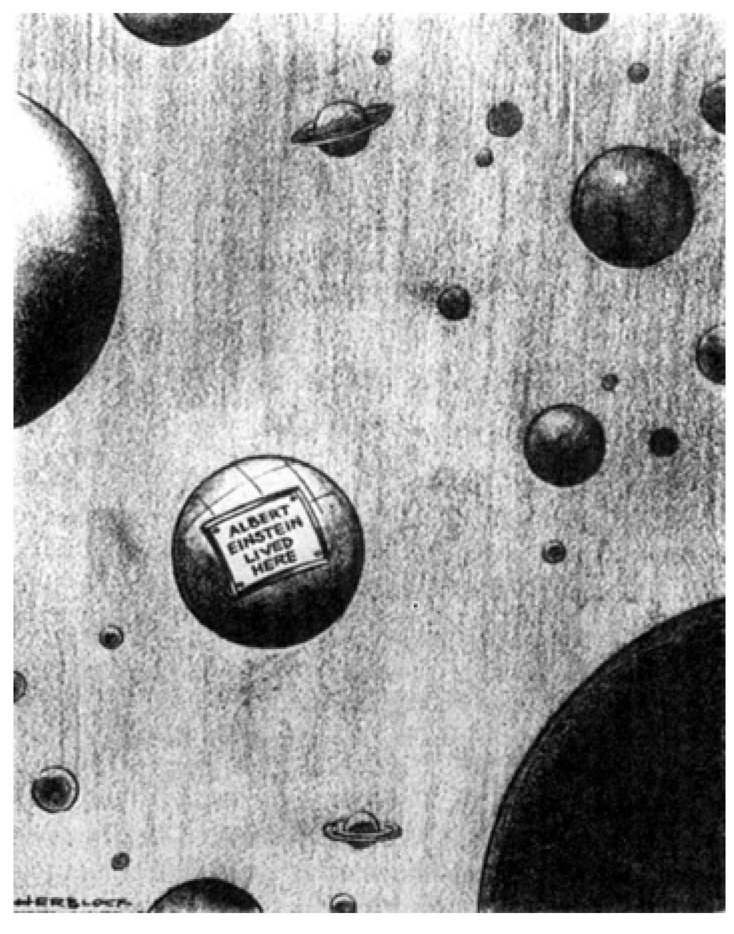


Figura 4.7. Un dibujo de Herblock en el Washington Post publicado el 18 de abril de 1955, día de la muerte de Einstein.

Cualquier civilización más avanzada tiene muchas probabilidades de ser más vieja y más inteligente de lo que somos nosotros hoy. Físicos como Ed Witten han hecho la hipótesis mencionada y han argumentado que, dado el tiempo suficiente, los demás tendrían que converger a una Teoría de Todo, si tal teoría existe. Pero quizá no sea así. Nuestro propio progreso en ciencia ha sido acelerado muchas veces por algunas notables circunstancias casuales de nuestra situación en el Universo. La igualdad de los tamaños aparentes del Sol y la Luna es un ejemplo notable.

Uno de nuestros atisbos más claros de una Teoría de Todo lo proporciona la extraordinaria teoría de la gravitación de Einstein: la teoría de la relatividad general. Ésta fue presentada por primera vez en 1915, 228 años después de

ser publicada la ley de la gravedad de Newton. La ley clásica de Newton funciona muy bien en todas las situaciones prácticas en la Tierra, porque la gravedad es relativamente débil. Pero, en presencia de fuerzas gravitatorias muy intensas, las trayectorias de los rayos luminosos pueden curvarse y la teoría de Newton no puede explicar lo que se ve. En estas situaciones, la teoría de Einstein es acertada con una precisión impresionante. Pero las diferencias entre las predicciones de la teoría de Einstein y las de la teoría simplificada de Newton son muy pequeñas: incluso en la escala del Sistema Solar, suponen no más que una parte en una cienmilésima, y sólo son observables en circunstancias inusuales.

La teoría de Einstein predice que cuando la luz de una estrella lejana pasa rozando la superficie del Sol, su trayectoria se curvará como si estuviera sintiendo la atracción de la gravedad del Sol. La cantidad de esta «curvatura de la luz» es muy pequeña, y las únicas circunstancias en que podemos verla son las creadas por un eclipse total de Sol. Durante un eclipse, los astrónomos pueden determinar qué estrellas lejanas pueden verse y cuáles están eclipsadas. Puesto que sus posiciones en el cielo en cualquier momento pueden predecirse con mucha precisión, podemos determinar cuánto se ha curvado la luz procedente de una estrella lejana a causa del Sol anotando simplemente las posiciones de las estrellas que habrían sido eclipsadas si la luz viajara en línea recta (Figura 4.8). Sin la coincidencia que crean para nosotros los eclipses totales de Sol, esta predicción de la teoría de la relatividad general de Einstein no podría haber sido comprobada. Einstein hizo estas predicciones sobre la curvatura de la luz estelar en 1916, durante la Primera Guerra Mundial. Afortunadamente hubo un eclipse en 1919, poco después del final de la guerra, y ocurrió frente al mejor campo estelar para poner a prueba las predicciones de la curvatura de la luz.

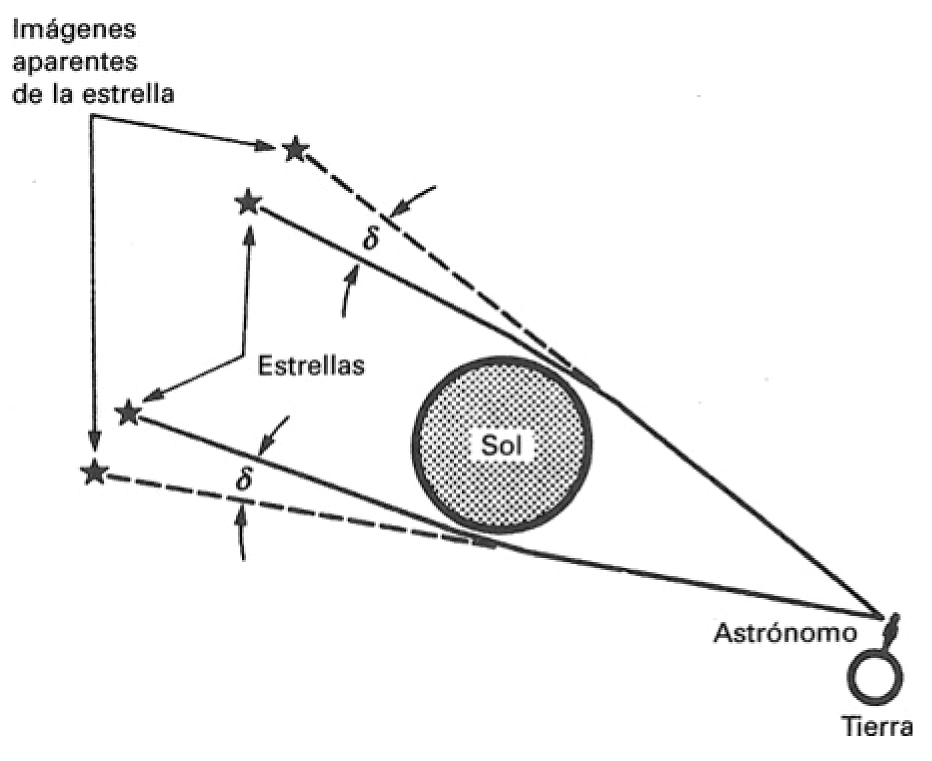


Figura 4.8. Desviación gravitatoria de los rayos luminosos procedentes de estrellas lejanas cuando pasan cerca del Sol. La desviación es el ángulo entre la posición observada de una estrella en el cielo durante el eclipse total (cuando la luz es desviada por la gravedad del Sol) y su posición cuando el Sol está en otro lugar en el cielo (y así el efecto gravitatorio del Sol es despreciable). En el caso del Sol, esta desviación (el ángulo δ) es de aproximadamente 0,000486 grados.

El otro gran éxito de la teoría de Einstein para nuestra comprensión del Sistema Solar, que sirvió para confirmar a los astrónomos de la época la verdad esencial de la teoría, depende también de una rareza del Sistema Solar. Cuando los planetas orbitan alrededor del Sol, sus órbitas no son perfectamente elípticas debido a las perturbaciones que sufre cada planeta por parte de los demás. Los óvalos no llegan a cerrarse, y la órbita siguiente traza un óvalo similar pero ligeramente desplazado respecto a la órbita anterior. Con el tiempo, la trayectoria del planeta tendría una forma de roseta, como la que se muestra en la Figura 4.9. Decimos que la órbita oval

«precede». La cantidad de precesión puede medirse por el ángulo entre los ápsides sucesivos de la órbita.

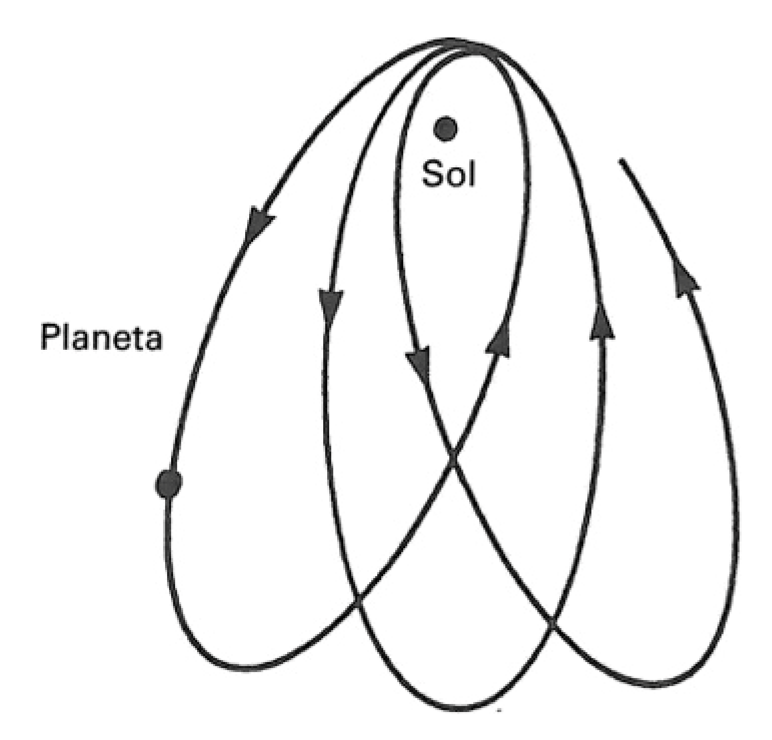


Figura 4.9. Una órbita que precede. La órbita del planeta es aproximadamente una elipse que rota su orientación.

Algunas contribuciones a esta precesión se conocían desde la época de Newton. Las mayores proceden de los tirones que recibe el planeta en órbita debidos a las atracciones gravitatorias de todos los cuerpos del Sistema Solar aparte del Sol. Pero a finales del siglo XIX se había planteado un problema embarazoso. Una vez que se habían tenido en cuenta todas las perturbaciones conocidas, la órbita del planeta Mercurio mostraba una misteriosa precesión residual inexplicada. Equivalía a una precesión de tan sólo 43 segundos de arco[33] por siglo.

La teoría de la relatividad general de Einstein predecía correcciones minúsculas (de una parte en 100 000) a las predicciones clásicas de Newton

[33] Hay 360 grados en un círculo, 60 minutos de arco en un grado, y 60 segundos de arco en un minuto de arco. Un segundo de arco se denota por”.

relativas a las órbitas de los planetas en torno al Sol. En efecto, muy cerca del Sol, donde la atracción de la gravedad del Sol es más intensa, hay desviaciones minúsculas de la famosa ley de la gravedad de Newton que había predicho que la intensidad de la fuerza gravitatoria del Sol debería decrecer como el cuadrado de la distancia a su centro. La teoría de Einstein predecía que la corrección a la ley de Newton debería producir una precesión de la órbita de Mercurio equivalente a 43 segundos de arco por siglo —exactamente lo que se requería para explicar la persistente discrepancia—. Ahora bien, esta precesión ocurre para todas las órbitas planetarias, pero su magnitud depende de la distancia del planeta al Sol. Cuanto más lejos está el planeta del Sol, más pequeña es la cantidad de precesión que crea la gravedad del Sol. Para todos los planetas de nuestro Sistema Solar aparte de Mercurio (el más próximo al Sol), la precesión es demasiado pequeña para ser observada. Si nuestro Sistema Solar no hubiera contenido un planeta tan próximo al Sol como Mercurio, no se habría alterado el curso de los acontecimientos que condujeron a la evolución de la vida inteligente en la Tierra, pero se nos hubiera robado una oportunidad única de comprobar la verdad de la teoría de la gravedad de Einstein.

La doble coincidencia de la proximidad de Mercurio al Sol y la visibilidad de eclipses desde la Tierra, ocasionada por la similitud de los tamaños aparentes de la Luna y el Sol, ha tenido las más profundas consecuencias para el desarrollo del conocimiento humano. Debido a estos dos accidentes fuimos capaces de poner a prueba la teoría de la gravedad con gran precisión, y utilizarla con confianza para explicar fenómenos mucho más alejados en el Universo. Sin estas coincidencias nos habríamos quedado durante medio siglo con la bella teoría de Einstein como un monumento al ingenio humano, sin ninguna forma de descubrir si era verdadera o falsa. Vemos así cómo aspectos accidentales de una civilización extraterrestre podrían tener consecuencias sutiles y de gran alcance para su desarrollo intelectual. Si se vive en un gran planeta solitario, que da vueltas alrededor

de una estrella como el Sol, entonces, para que las condiciones sean suficientemente frías para soportar la vida, dicho planeta debe estar tan lejos de la estrella que su precesión orbital sea demasiado pequeña para que se pueda descubrir una teoría de la gravedad mejor que la de Newton. Sin una luna en una situación muy especial, y del tamaño correcto, no se verían eclipses totales y sería imposible descubrir la curvatura de la luz por la gravedad de su estrella. Y, de hecho, sin la existencia de otros planetas sólo se tendría una visión muy sesgada de todo el asunto de la formación planetaria.

La lección a sacar de este pequeño ejemplo es simple. No hay que suponer que los extraterrestres, por muy avanzados que estén cerebralmente, vayan a descubrir inevitablemente todas las aproximaciones a las leyes de la física que finalmente convergerán en una Teoría de Todo. Muchos de estos descubrimientos requieren la presencia de configuraciones ambientales en las que se manifiestan las diferencias entre aproximaciones sencillas y aproximaciones mejores a las verdaderas leyes de la Naturaleza. Todo lo que se necesita es un planeta cubierto de nubes para que una civilización desarrolle una comprensión maravillosa de la meteorología, sin la más mínima idea de astronomía. Una ausencia de magnetita, o una velocidad de rotación planetaria que sea demasiado lenta para crear un campo magnético apreciable, significa que el desarrollo de una comprensión del magnetismo se retrasaría considerablemente. Una rareza geológica podría significar que los elementos radioactivos estuvieran ausentes o enterrados a una profundidad inaccesible: el resultado sería un impedimento para una comprensión de las fuerzas nucleares débil y fuerte. Por supuesto, es fácil pensar en maneras de superar tales restricciones para nuestro conocimiento si nos fueran impuestas repentinamente aquí y ahora[34]. En realidad esto no importa. Quizá

[34] La mejor manera de comprobar ahora las predicciones de la curvatura de la luz consiste en examinar la curvatura de las ondas de radio emitidas por fuentes muy lejanas (cerca del límite del Universo visible), cuya posición puede medirse con gran precisión. Este método no requiere un eclipse, pero las fuentes lejanas de radiación son cuásares, y por eso nos encontramos sacando ventaja de otra feliz coincidencia: que el Sol pasa por

no hubiéramos dado nunca los primeros pasos difíciles por la ruta que llevaba a nuestro estado de conocimiento actual sin las posibilidades únicas que han proporcionado las rarezas de nuestra posición en el Universo. El conocimiento científico en civilizaciones de niveles de madurez muy similares será probablemente muy desigual. Reflejará los caprichos de su entorno local y los problemas que hay que superar para sobrevivir más cómodamente durante largos períodos de tiempo antes de que pudiera iniciarse cualquier investigación científica. La frecuencia de las guerras desempeñará un papel importante en la velocidad del avance tecnológico. El nivel de comprensión que posee cada civilización sobre la escala del Universo, y la naturaleza de sus contenidos, será muy susceptible a quedar truncado por una pobre visibilidad. Debemos recordar que aunque hay razones evolutivas para que los seres vivos promuevan su comprensión del entorno local —por ejemplo, las perspectivas de supervivencia aumentan por la comprensión del movimiento, la electricidad, la inmunología y la radioactividad— ninguna ventaja semejante parece ofrecer el conocimiento de que el Universo se está expandiendo o de que existen los agujeros negros. Quizá un día encontremos una. Si lo hacemos, quizá no sea una ventaja simple y directa. Sospecho que alguna otra ventaja práctica será posible sólo como un subproducto de este conocimiento más esotérico.

El molino de Hamlet. La errante Estrella Polar

[Jacob] tuvo un sueño en el que veía una escala que, apoyándose sobre la tierra, tocaba con su extremo en los cielos, y que por ella subían y bajaban los ángeles de Dios.

GÉNESIS 28: 12-13

---

delante de dos cuásares, de modo que la radiación de éstos pasa suficientemente cerca del Sol para ser desviada en una cantidad medible. Esto se hace midiendo el cambio en el ángulo entre los dos cuásares cuando pasan detrás del Sol.

La Tierra no está sola girando sobre su eje en las profundidades del espacio. La Luna y el Sol conspiran para crear un peculiar efecto adicional sobre el movimiento de la Tierra. La rotación de la Tierra hace que desarrolle una panza alrededor de las regiones ecuatoriales, donde son mayores las fuerzas centrífugas de rotación. Puesto que el eje de rotación de la Tierra está inclinado con respecto al plano de su órbita en torno al Sol, el abombamiento ecuatorial de la Tierra tampoco está localizado en el plano de su órbita. Como resultado, el campo gravitatorio del Sol ejerce una fuerza sobre la Tierra que tiende a mover el eje de la Tierra de modo que su abombamiento quede en el plano de su órbita (Figura 4.10).

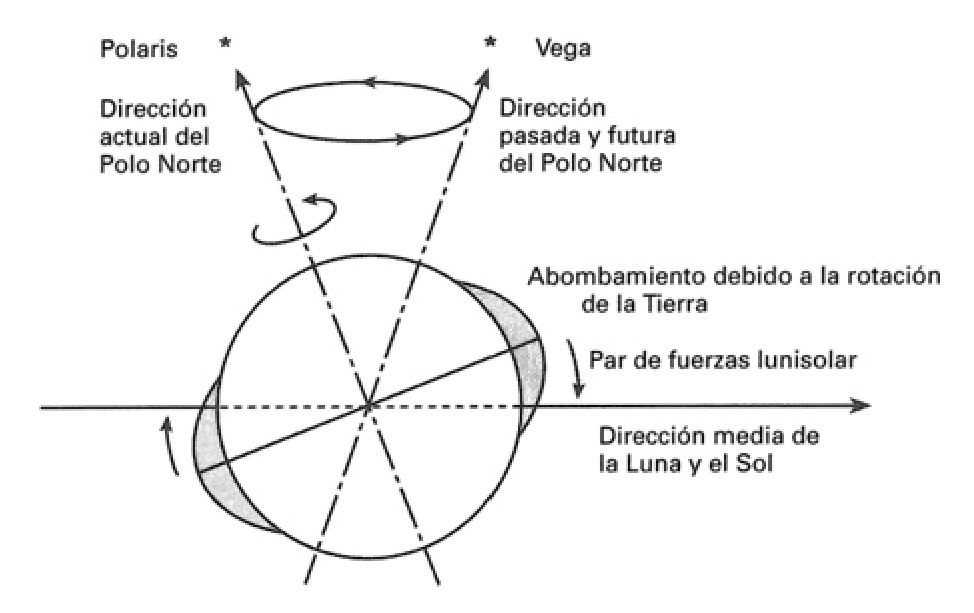


Figura 4.10. Precesión del eje de rotación de la Tierra. La atracción del Sol y la Luna sobre el abombamiento ecuatorial de la Tierra (exagerado aquí) provoca que el eje de rotación de la Tierra preceda lentamente alrededor del polo de la eclíptica cada 26 000 años aproximadamente con respecto a las estrellas lejanas.

Además, el plano ecuatorial de la Tierra no está alineado con el plano de la órbita de la Luna y, puesto que está más cerca de la Tierra, la Luna ejerce un

par de fuerzas sobre la Tierra en rotación que es incluso mayor que la que ejerce el Sol. Los efectos de dichas fuerzas sobre la Tierra son similares a los que vemos cuando empujamos una peonza. En lugar de cambiar simplemente la dirección de su eje de rotación, lo que hacemos es que la dirección en que apunta el eje rote, o preceda, en un círculo. La atracción gravitatoria de la Luna y el Sol sobre el abombamiento ecuatorial de la Tierra tiene un efecto similar, y por ello cambia lentamente la dirección del Polo Norte de la Tierra. El polo tarda 26 000 años en completar su círculo de precesión y volver a apuntar en la misma dirección. La tradición sostiene que este fenómeno fue descubierto inicialmente por el astrónomo griego Hiparco el año 125 a. C. Se cree que comparó las posiciones de las estrellas que él observaba en el cielo con las posiciones registradas por otros dos siglos antes, y así descubrió que habían cambiado sistemáticamente. (No obstante, más adelante en este mismo capítulo sugeriremos que pudo haberse dado cuenta de otra manera).

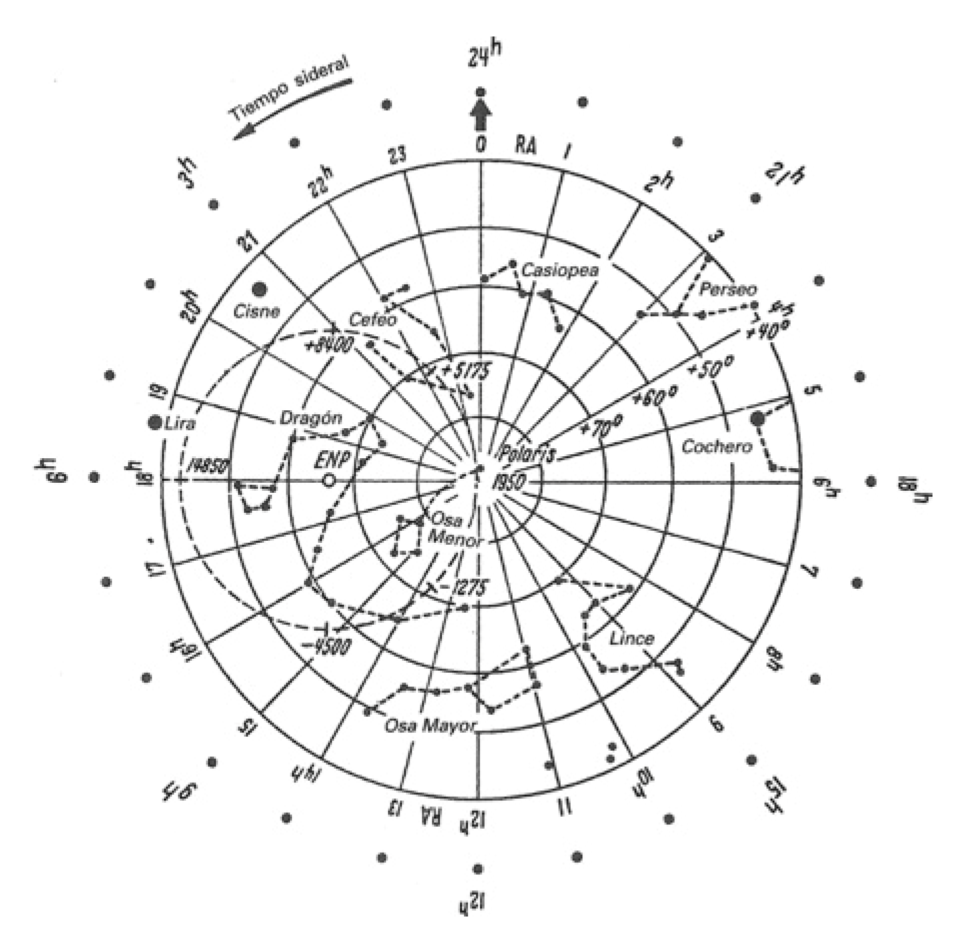


Figura 4.11. La trayectoria del Polo Norte celeste visto desde una latitud de 50 grados norte (por ejemplo, la de Praga o Frankfurt). La posición del Polo Norte celeste está trazada (en línea de trazos) para varias fechas antes y después del año 1950 d. C. Actualmente está muy cerca de Polaris, la Estrella Polar.

Una de las consecuencias de la precesión de la Tierra es cambiar la dirección en que apunta el Polo Norte. Actualmente somos bastante afortunados. La posición de la Estrella Polar (Polaris) marcada por sus compañeras, los dos «punteros», es una aproximación muy buena a la posición verdadera del polo celeste exacto. Por el contrario, no hay ninguna estrella situada convenientemente en el cielo austral que señale la dirección del Polo Sur en el cielo. «Polaris» es el término latino para «del polo», y deriva de la palabra griega *polos* que significa un «pivote» o un «eje», aunque este término no fue utilizado por los astrónomos hasta el Renacimiento. Somos bastante

afortunados, porque Polaris es una de las estrellas más brillantes en el cielo —de hecho, la más brillante en un radio de aproximadamente medio grado (el tamaño de la Luna llena) en el cielo durante los 26 000 años que dura la trayectoria de precesión del «polo»—. Durante la mayor parte de esta trayectoria no había ningún candidato cercano para utilizar como Estrella Polar, pero Polaris está actualmente a tan sólo unos 44 minutos de arco del verdadero Polo Norte. Los griegos y los romanos no tenían ninguna Estrella Polar. Shakespeare, que escribía en 1599, hace decir a Julio César que él es «constante como la estrella del Norte», pero esto es un completo anacronismo. Hiparco nos dice, aproximadamente en el año 125 a. C., que «en el polo no hay ninguna estrella». La Figura 4.11 muestra la trayectoria de la dirección del Polo Norte frente a las estrellas, durante el pasado y en el futuro. Dentro de mil años le tocará a Vega ocupar el puesto como estrella más próxima a la dirección del polo, pero los navegantes encontrarán que es una pobre sustituta para Polaris, porque estará a varios grados del polo verdadero.



Figura 4.12. Una fotografía de larga exposición dirigida hacia el Polo Norte celeste registra las estelas que dejan las estrellas septentrionales cuando

siguen sus trayectorias circumpolares. El Polo Norte celeste es el único punto en el cielo que no se mueve; está muy cerca de Polaris, nuestra Estrella Polar, que está situada convenientemente sobre el vértice del árbol en esta fotografía de Michael McDermott.

Los polos tienen una profunda importancia para muchos de los que observan el cielo. Determinan un eje alrededor del cual parece dar vueltas todo el cielo. En la Figura 4.12 se muestra esto de forma muy gráfica en una fotografía de larga exposición donde aparecen las estelas que dejan las estrellas en sus trayectorias circulares centradas en el eje del polo. Podemos ver cómo Polaris (oportunamente cerca de la copa del árbol en la fotografía) marca el punto central alrededor del que se mueven todas las demás estrellas. No es sorprendente que para los antiguos, y para los pueblos de muchas culturas tradicionales, esta rotación celeste y la dirección alrededor de la cual se hace, tuviera un significado profundo y mágico. El polo era el único objeto estable y fijo en el cielo en un mar de movimiento que amenazaba con desplazarlo y sumirlo en el caos. Los antiguos egipcios lo veían como un camino celeste que llevaba a la vida eterna. En muchas culturas escandinavas y de Eurasia septentrional, la Estrella Polar se llama la «Estrella Clavo» para resaltar su posición fija —«clavada» en el cielo—. En el Imperio Chino, el polo apuntaba al trono del soberano del cosmos, alrededor del cual se disponían las estrellas.

En virtud de su profundo estatus en el centro del cielo, la estrella más próxima al polo se convirtió en fuente de leyendas de todo tipo. Su ubicuidad inspiró a dos historiadores, Hertha von Pechend y Giorgio de Santillana, para atribuir un enorme corpus de mitologías y leyendas antiguas a pronósticos cataclísmicos sobre el gran eje del cielo. Titularon su libro *El molino de Hamlet,* en reconocimiento de las muchas tradiciones antiguas que comparaban el movimiento circular de las estrellas alrededor del polo celeste con el movimiento de una rueda de molino. Encontramos este motivo en

muchas de las leyendas de Siberia y Escandinavia. En el siglo I a. C. hallamos a los astrónomos griegos que se refieren al polo como un lugar donde «los cielos dan vueltas a la manera de una rueda de molino». Armados con este tema mitológico común a varias culturas centrado en un molino mágico en el cielo, y su simbolización de estabilidad y riqueza, Von Dechend y De Santillana se proponen interpretar muchos mitos y fábulas en todo el mundo como identificaciones codificadas de la importancia del eje del cielo. Intentan argumentar que en muchos mitos y creencias humanas sostenidos por culturas separadas —y con ello en las inclinaciones culturales que inducen— hay una homogeneidad que nace de la importancia compartida que atribuyen al eje del cielo. Este es un tema potencialmente más amplio que el estudio que ellos hacen. Las civilizaciones extraterrestres estarán limitadas casi con certeza a vivir en sistemas solares que compartan muchas características con el nuestro: una estrella estable similar, aproximadamente a la misma distancia para crear condiciones suficientemente templadas para soportar la vida, rotando en torno a un eje que apunta hacia dos direcciones privilegiadas («norte» y «sur») en el cielo. Muy bien podrían aparecer mitos, especulaciones e historias no muy diferentes en acento (aunque diferentes, por supuesto, en sus particularidades) de las que encontramos en la Tierra. Aunque los autores de *El molino de Hamlet* indudablemente se exceden en su búsqueda de un soporte astronómico para cada mito y leyenda humanos bajo el Sol, y su montaña de información histórica representa a veces poco más que una mezcla de asociaciones bien intencionadas, su libro contiene un núcleo de verdad. La lección que nos enseña es que la experiencia humana compartida de los cielos ha dejado su impronta en nuestra imaginación en épocas precientíficas. Los mitos suelen ser intentos de unir los cielos y la Tierra. Las impresionantes imágenes celestes, ya sean de la Luna o del Sol, o del eje del cielo en torno al cual gira el mundo, son experiencias humanas compartidas

por muchos. No es casual que constituyan la base de tantas fantasías humanas y anhelos religiosos.

Todos los mitos sobre el eje del cielo se encuentran en culturas que viven en latitudes septentrionales. Hay una razón profunda para ello: una razón que ha tenido consecuencias mucho más amplias para la conciencia creciente del paisaje celeste por parte de la humanidad. El cielo nocturno en los trópicos es muy diferente del cielo en latitudes más templadas. Durante mucho tiempo, exploradores y antropólogos estuvieron intrigados por las diferencias entre los sistemas astronómicos desarrollados por culturas tropicales sofisticadas durante los últimos dos mil años y los encontrados en Europa y Norteamérica. No llegaron a darse cuenta del carácter diferente del cielo a bajas latitudes. Como ya hemos comentado, cuando se ven desde el Ecuador, las estrellas parecen rotar alrededor del polo celeste, dándole la apariencia del centro de las cosas. Cuanto mayor sea la latitud, más alto en el cielo estará el polo celeste. Desde latitudes septentrionales todos los movimientos celestes parecen estar centrados en el polo; pueden verse menos estrellas, pero muchas de ellas son visibles siempre y por ello pueden ser utilizadas como medida del tiempo y como orientación. Los cielos tropicales no son así. Un observador encuentra en ellos que los movimientos de las estrellas reflejan la rotación de la Tierra.

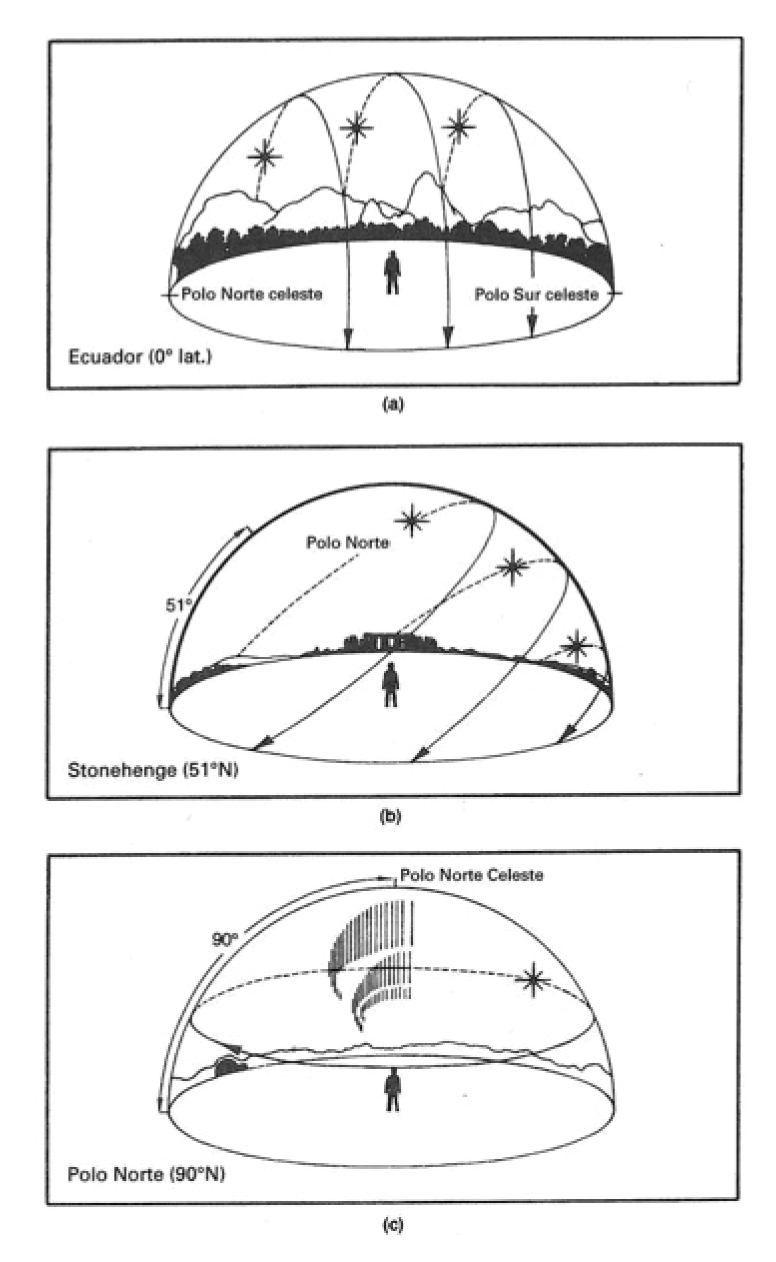


Figura 4.13. Variación en la apariencia del cielo nocturno con la latitud del observador debida al cambio de posición del polo celeste alrededor del cual parecen rotar las estrellas: (a) en el Ecuador; (b) a latitudes medias; (c) en el Polo Norte.

En el Ecuador pueden atisbarse todas las estrellas, aunque los polos celestes se pierden en el horizonte. Las estrellas ascienden, alcanzan su cénit y luego descienden y se ocultan. Cuando una estrella asciende, su dirección permanece relativamente constante y ofrece un excelente «punto fijo» para

la navegación durante un buen período de tiempo. Hay muy poco movimiento horizontal y el cielo parece muy simétrico. Por esta razón, encontramos que muchas culturas oceánicas imaginaron constelaciones lineales que seguían los caminos ascendentes de las estrellas. Por el contrario, cuando pasamos a latitudes septentrionales los movimientos estelares tienen una mezcla de componentes vertical y crecientemente horizontal, y el cielo parece más asimétrico. La apariencia del cielo nocturno es así, en muchos aspectos, más sencilla para el observador tropical. Él parece estar en el centro de las cosas, por debajo de una bóveda celeste de movimientos en arco que puede utilizar para fijar direcciones de viaje (Figura 4.13).

En el caso de nuestros observadores del Pleistoceno en África no hubiera existido ningún eje polar aparente; las estrellas hubieran pasado sobre sus cabezas, haciéndoles sentirse en el centro del mundo. Sin embargo, aunque se puede ganar una ventaja adaptativa de una sensibilidad a los períodos de la Luna —de modo que las noches de luz de Luna pueden explotarse para la caza, y la vigilancia puede incrementarse en oscuras noches sin Luna cuando el peligro de un ataque por sorpresa es máximo— ninguna ventaja semejante se les ofrecía a los primitivos observadores de estrellas. En las noches más oscuras, la luz de miles de estrellas podría ofrecer cierta comodidad y seguridad. Pero es mucho más útil generar una fascinación por el fuego. Las hogueras ofrecen protección de las bestias, mientras que la luz de la Luna y la luz de las estrellas ayudan a ser visto tanto como a ver. Los moradores terrestres de la sabana no necesitaban navegar de noche. Sólo los marineros y los viajeros nocturnos de largas distancias necesitaban estudiar las estrellas. Pero quizá un interés por las estrellas sea un subproducto inevitable de una fascinación por la Luna. Puesto que una respuesta a las fases de la Luna ofrece ventaja adaptativa, la sensibilidad a la luz de la Luna y de las estrellas sería generada de forma natural en los supervivientes.

Luna de papel. Controlando los planetas caóticos

Quizá era ésa la condición necesaria para la vida planetaria: tu Sol debe encajar con tu Luna.
MARTIN AMIS,
Campos de Londres

Hemos visto que la inclinación del eje de la Tierra —la oblicuidad de la eclíptica— es la fuente de nuestras variaciones estacionales. Incluso pequeños cambios en esta oblicuidad pueden tener consecuencias potencialmente catastróficas para nuestro clima. Durante mucho tiempo se ha sospechado que perturbaciones en el período de 26 000 años de precesión de la Tierra, provocadas por la Luna o los planetas, podrían crear pequeños cambios en el ángulo de oblicuidad que, tan sólo con que equivalieran aproximadamente a un grado, serían suficientes para explicar la existencia de las eras glaciales. Esta teoría fue propuesta por primera vez hace sesenta años por un yugoslavo, Milutin Milankovitch, mientras era prisionero del Imperio Austro-Húngaro durante la Primera Guerra Mundial. (Pese a ello, la Academia de Ciencias húngara le permitió proseguir sus estudios en Budapest). Argumentó que cambios pasados en la rotación y oblicuidad de la Tierra alterarían la cantidad de energía solar que llega a diferentes partes de su superficie a altas latitudes y producirían variaciones en temperatura y glaciación que podrían estar correlacionadas con las pruebas geológicas de eras glaciales pasadas. Más recientemente, el comportamiento pasado de la oblicuidad de la Tierra ha sido ilustrado por nuevos estudios, por parte de Jacques Laskar y sus colegas en París, que revelan la importancia de la presencia de la Luna para la habitabilidad de la Tierra.

Sobre períodos de tiempo muy largos, la velocidad a la que precede el eje polar de la Tierra (actualmente unos 50” por año), su oblicuidad y la forma de la órbita de la Tierra alrededor del Sol cambian ligeramente en respuesta al incremento de la distancia de la Tierra a la Luna y a las influencias gravitatorias de los demás planetas. Actualmente el efecto es muy pequeño: la oblicuidad está cambiando a una velocidad de 47” cada siglo. Pero si este cambio se extrapolara hacia atrás tan siquiera medio millón de años, el cambio en la oblicuidad de la Tierra sería enorme —más de 65 grados— y los cambios climáticos absolutamente devastadores: los trópicos dejarían de existir. Por suerte para nosotros, extrapolar hacia atrás la velocidad de cambio actual de la oblicuidad no es una indicación fiable de lo que le sucede durante centenares de miles de años. Su comportamiento es mucho más complejo. Para determinar cómo evoluciona la oblicuidad, debemos considerar otros aspectos del movimiento de la Tierra a los que está ligada. El más importante es la velocidad de precesión, que está determinada por la longitud del día, puesto que es una medida de la velocidad de rotación del planeta. Lo que hace potencialmente azarosa la evolución a largo plazo de la oblicuidad es el fenómeno de «resonancia». Estamos familiarizados con ello en muchas situaciones mundanas. Si impulsamos a un niño en un columpio, hay una frecuencia particular de los impulsos que crea una respuesta del columpio especialmente grande. Esto es una resonancia; se da en cualquier situación en la que la frecuencia con la que se aplica una perturbación externa coincide con la frecuencia de oscilación natural del sistema. Las consecuencias pueden ser a veces devastadoras, como lo fueron para el tristemente famoso Puente de Tacoma en Oregón, que se rompió tras la amplificación resonante de las oscilaciones de torsión del puente provocadas por vientos fuertes. Cuando otros planetas perturban la Tierra con una frecuencia igual a su frecuencia de precesión, se produce resonancia, y puede crear un cambio en su oblicuidad en tan sólo decenas de miles de años. Puesto que la distancia entre la Tierra y la Luna está aumentando

continuamente, a una tasa de unos 3 centímetros por año (aproximadamente, la velocidad de crecimiento de las uñas), muchas de estas interacciones resonantes podrían haber ocurrido en el pasado, cuando la Luna estaba más cerca y la Tierra estaba rotando más deprisa.

Simulaciones detalladas por computador de la evolución de la rotación, precesión y oblicuidad de todos los planetas del Sistema Solar han revelado una situación notable. Debido a su extrema sensibilidad a los efectos combinados de las perturbaciones resonantes, la oblicuidad de un planeta puede evolucionar caóticamente durante largos períodos de tiempo en respuesta a pequeñas perturbaciones. Con ella cambian la velocidad de rotación y, como consecuencia, la distorsión de la forma del planeta. Antes de considerar la Tierra, es interesante ver los resultados para Marte. Marte es un objeto más simple para estudiar porque no tiene lunas lo bastante grandes para desempeñar un papel importante en la evolución de su rotación y oblicuidad; probablemente su rotación es primordial, residuo de las condiciones que acompañaron su formación. Precede a 8,26” por año, un ritmo que está próximo a la frecuencia de algunas de sus vibraciones naturales. Como resultado, se espera que su oblicuidad haya variado caóticamente en todo el rango de 0 a 60 grados (véase la Figura 4.14). Por lo tanto, su oblicuidad presente de 24 grados podría haber aparecido a partir de cualquier valor dentro de ese amplio intervalo. La sensibilidad caótica de su precesión significa que no podemos reconstruir su historia pasada antes de 100 millones de años y determinar así su oblicuidad inicial: las incertidumbres en su movimiento actual destruirán con el tiempo cualquier intento de extrapolación adicional al pasado. Ésta es la situación clásica para un sistema físico «caótico». Aunque podamos estar en posesión de una ley exacta que predice el futuro del sistema a partir de su pasado, cualquier incertidumbre en la especificación de su estado pasado se amplificará tan rápidamente que la ley exacta es cada vez menos útil; finalmente, no da la

más mínima información sobre el estado futuro del sistema. Del mismo modo, el pasado no puede encontrarse a partir del futuro.

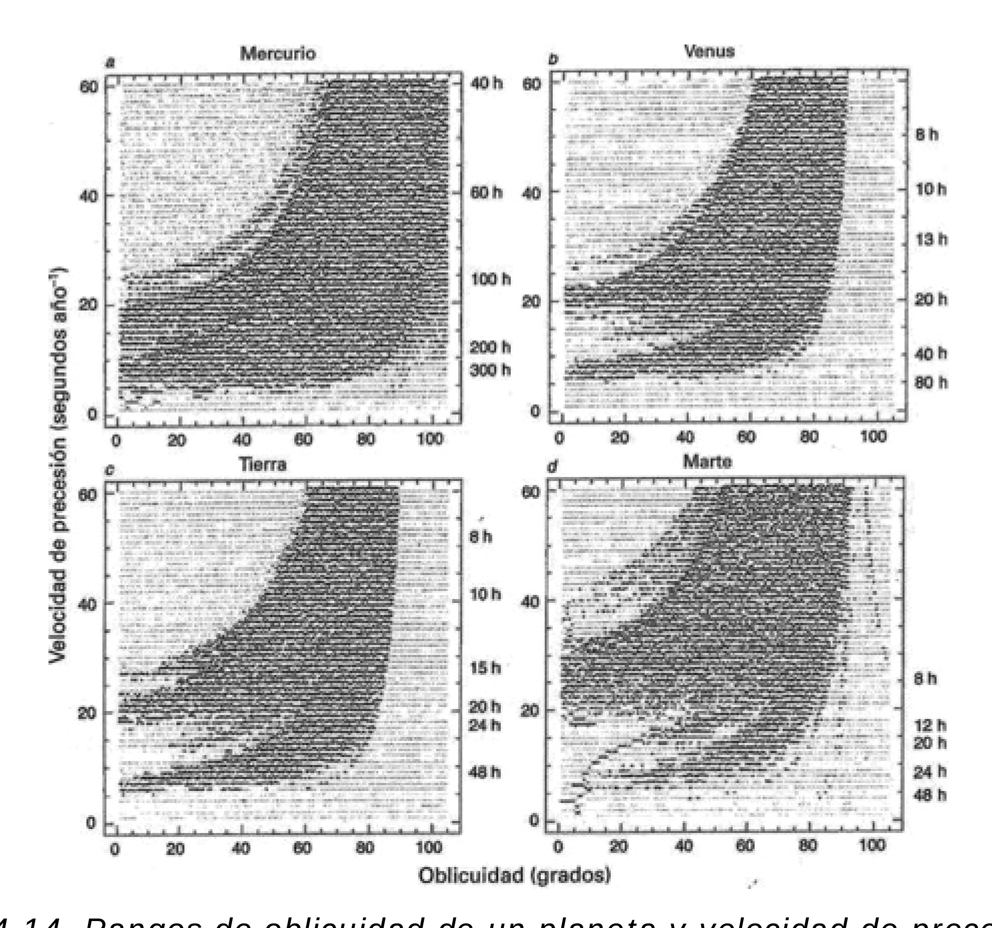


Figura 4.14. Rangos de oblicuidad de un planeta y velocidad de precesión de giro que llevan a evolución caótica o regular de su oblicuidad con el tiempo. La precesión de giro está dada en unidades de segundo de arco por año en el eje vertical izquierdo, con el correspondiente período de rotación mostrado en el eje vertical derecho. Se muestran los casos de Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Las regiones oscuras son las que muestran variaciones caóticas; las más iluminadas significan evolución regular de la oblicuidad. En una zona caótica, la oblicuidad puede variar en cualquier parte a lo largo de una línea horizontal dentro de la zona. Típicamente, la anchura entera de una zona caótica será explorada erráticamente en unos pocos millones de años. La situación actual de la Tierra, con la Luna cercana, está representada por un punto con una velocidad de precesión de 55 segundos de arco por

año y una oblicuidad de aproximadamente 23 grados. Esto cae cómodamente dentro de la zona regular. Valores actuales para la oblicuidad (inclinación) de cada planeta y período de rotación pueden encontrarse en la Tabla 4.1.

Una evolución caótica similar es válida para Mercurio y Venus. En contraste, la evolución de la oblicuidad de los grandes planetas exteriores (Urano, Júpiter, Saturno y Neptuno) es mucho más estable porque sus velocidades de precesión son mucho menores (menos de 5” por año) y difícilmente se dan fuertes efectos resonantes. Entre estos extremos de caos y estabilidad, que distinguen los planetas interiores de los exteriores, se encuentra el caso único de la Tierra.

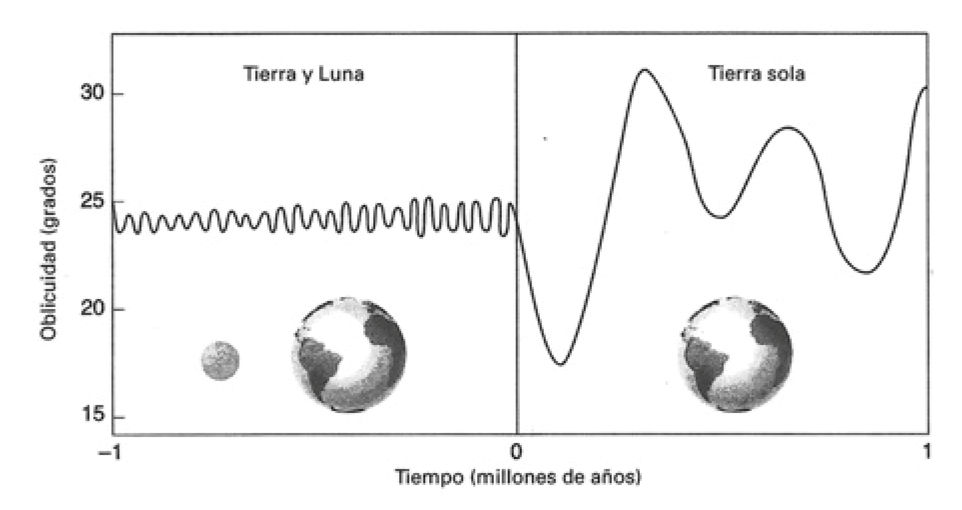


Figura 4.15. Variación temporal esperada en la oblicuidad de la Tierra con la Luna presente (izquierda) y ausente (derecha). La presencia de la Luna conduce a variaciones pequeñas estables (1,3 grados alrededor de un valor medio de 23,3 grados). Si la Luna estuviera ausente, habría variaciones grandes e irregulares. El ejemplo de la derecha fue computado eliminando la Luna del cálculo de la izquierda de la historia en el tiempo cero.

La evolución de su oblicuidad está dominada por la presencia de la Luna. Si la Luna no existiera, o fuera mucho más pequeña, la oblicuidad de la Tierra

evolucionaría caóticamente en todo el intervalo de 0 a 85 grados, permaneciendo durante millones de años por encima de 50 grados. Esto crearía una espantosa situación climática en la Tierra: los polos recibirían mucha menos radiación que el Ecuador. Dado que variaciones pasadas de sólo uno o dos grados han sido suficientes para desencadenar eras glaciales, variaciones de esta magnitud serían catastróficas para la evolución de la vida. Afortunadamente, la Luna existe. Su presencia actúa como una poderosa influencia estabilizadora, y su influencia gravitatoria permite que la oblicuidad de la Tierra no haga nada más espectacular que oscilar unos 1,3 grados en torno a su posición media de 23,3 grados[35] (véase la Figura 4.15). El periodo actual de decrecimiento de la oblicuidad es sólo una bajada en la secuencia oscilatoria. Algún día se invertirá. Sin embargo, no podemos concluir que la oblicuidad de la Tierra ha oscilado siempre en torno a su valor actual porque quizá la Luna no ha estado siempre presente. Podría haber habido un período de evolución caótica de la oblicuidad previo a la captura de la Luna por el campo gravitatorio de la Tierra o a su creación como resultado de un impacto en la proto-Tierra hace 4600 millones de años[36]. Después de dicha captura, su oblicuidad variable habría sido guiada por la Luna hacia un futuro de oscilaciones estables en torno a un valor de 23,3 grados. Una posible historia térmica para los dos casos se muestra en la Figura 4.16.

---

[35] Algunos estudios indican que cambios caóticos en oblicuidad podrían ser estabilizados, incluso en ausencia de la Luna, si la Tierra estuviese rotando con la suficiente rapidez, con días más cortos que 8 horas. Esto podría ocurrir porque un alto nivel de rotación aumenta el abombamiento ecuatorial de la Tierra: las mareas lunares tienen un efecto similar.

[36] Debido a las dificultades de explicar una captura y las similitudes de composición de la Luna y la Tierra con respecto a algunos isótopos, la «teoría del impacto» es actualmente preferida por los científicos planetarios. Esta teoría propone que la Luna surgió de un impacto entre la proto-Tierra y otro cuerpo. Un choque casi rasante permitiría que el núcleo del cuerpo incidente acreciera parte del corazón de la Tierra, mientras su manto se mezclaba con el de la Tierra en una forma vaporizada. Algo de este material caería sobre la superficie de la Tierra mientras que el resto se condensaría gravitatoriamente para formar la Luna. Esto explicaría el pequeño tamaño del núcleo de la Luna.

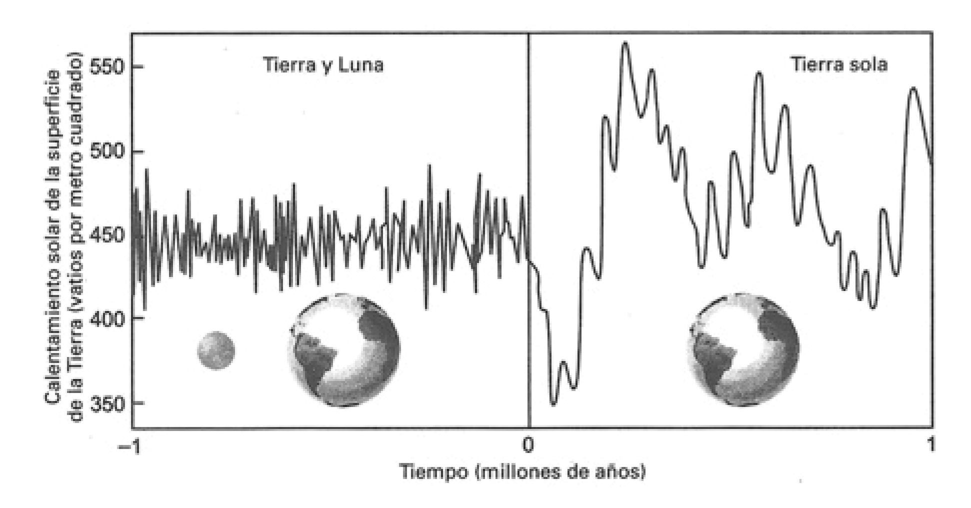


Figura 4.16. Variación temporal esperada en el calentamiento solar de la superficie de la Tierra en una latitud de 65 grados norte con la Luna presente (izquierda) y ausente (derecha).

Estos descubrimientos ponen de manifiesto la importancia crucial de una presencia lunar durante escalas de tiempo muy largas. Las moderadas variaciones climáticas de la Tierra están ligadas a los niveles de inclinación y rotación que posee la Tierra. Durante largos períodos de tiempo, la precesión del eje polar de la Tierra está impulsada por su velocidad de rotación y, junto con su oblicuidad, responde ocasionalmente a los otros cuerpos del Sistema Solar. Estas respuestas serían erráticas, cambiando espectacularmente cada 100 000 años o menos, si no fuera por la presencia pacificadora de la Luna. Un clima estable necesita la Luna; en otros mundos en los que haya empezado la evolución de vida compleja, ésta puede encontrarse extinguida, o eternamente paralizada, por la necesidad de adaptarse a enormes variaciones climáticas a menos que también su planeta tenga una luna como pareja de baile.

Marte en sus ojos. Vinieron del espacio exterior

El objetivo de la ciencia no es abrir la puerta a la sabiduría infinita, sino poner un límite al error infinito.
BERTOLT BRECHT

Marte es el cuarto planeta a partir del Sol y el séptimo en tamaño en el Sistema Solar. Recibe su nombre en honor de Ares, el mitológico dios griego de la guerra por razones que no están totalmente claras, pero quizá debido a su color rojo. En nuestras culturas, Marte es sinónimo de extraterrestre. La palabra «marciano» es habitual. El mes de marzo deriva de Marte, y secciones enteras de las tiendas de golosinas están dedicadas a vender barras de chocolate Marte. Esto es curioso. Los grandes planetas como Saturno, Júpiter y Neptuno tienen un perfil terrestre mucho más bajo. ¿Es que sus habitantes han recurrido a una mala agencia publicitaria o podría haber algo en Marte que le haga mucho más fascinante para el terrícola medio? ¿Cómo se convirtió en la personificación de un mundo alienígena?

Marte es fácilmente visible a simple vista en el cielo nocturno. Su brillo es muy variable, como lo es su distancia a la Tierra. Cada 26 meses Marte alcanza su máxima aproximación a la Tierra y podemos enviar allí una sonda espacial con el mínimo gasto de combustible. Por eso es por lo que en 2004 parecía que estábamos viendo naves espaciales de Europa y América haciendo cola para aterrizar u orbitar en torno al planeta rojo. Era una de esas épocas de máxima aproximación.

Aunque es bastante más pequeño que la Tierra, Marte tiene aproximadamente la misma superficie de tierra firme. Tiene dos lunas minúsculas, Deimos y Phobos, que parecen patatas deformadas. Phobos sólo tiene unos meros 22 kilómetros y Phobos unos insignificantes 12 kilómetros de diámetro. Ambos son simplemente asteroides que se acercaron demasiado a Marte y quedaron atrapados por su gravedad.

Nuestra fascinación por Marte ha estado alimentada por sugerentes pautas visibles en su superficie. En otoño de 1877, cuando Marte estaba también próximo a la Tierra, el gran astrónomo planetario italiano Giovanni Schiaparelli (tío de la famosa diseñadora de moda Elsa Schiaparelli) en el Observatorio Brera en Milán creyó que veía cañones naturales *(canali)* en la superficie de Marte. Cuando sus informes se tradujeron al inglés, *canali* se convirtió en «canales», sugiriendo que habían sido construidos artificialmente por marcianos locales con fines de irrigación o transporte. Bautizó a las áreas oscuras y brillantes en la superficie del planeta con nombres de mares, cabos y penínsulas terrestres, acuñando nombres exóticos y eufónicos como las Herculis Columnae (Columnas de Hércules), Aurorae Sinus (Bahía de la Aurora) y Solis Lacus (Lago del Sol). Con estos vuelos de imaginación, Schiaparelli había recreado Marte a imagen de una antigua Tierra, preñada de mito y significado. No volvió a ser lo mismo.

Intrigado por los dibujos y detallados informes observacionales de Schiaparelli, el astrónomo americano Percival Lowell añadió peso a esta idea equivocada. En 1894, afirmó que la malla intrincada de marcas superficiales era resultado del trabajo de seres inteligentes que habitaban en el planeta Marte incluso ahora. Lowell expuso sus ideas en tres libros: *Marte* (1895), *Marte y sus canales* (1906) y *Marte como morada de la vida* (1908), y para entonces Marte se había convertido en el lugar más fascinante del Sistema Solar.

Este trabajo preliminar especulativo puso los cimientos para la obra de grandes escritores de ciencia-ficción como H. G. Wells y Olaf Stapleton y un montón de sucesores que continúan hoy con la misma fuerza. El público norteamericano asumió de forma tan entusiasta la idea de marcianos inteligentes que el sábado 30 de octubre de 1938, víspera de Halloween, el joven Orson Welles creó el pánico entre millones de norteamericanos que sintonizaron ya empezada su adaptación radiofónica de *La guerra de los mundos* de Wells. Llegaron a convencerse de que estaban oyendo informes

de una invasión real de América por parte de los marcianos. Un enorme objeto llameante había aterrizado en New Jersey. Los noticiarios entraban en la historia, leídos por actores que describían a los marcianos cuando salían de sus naves espaciales:

> *Me parecen tentáculos. Allí puedo ver el cuerpo de la cosa. Es grande como un oso y brilla como el cuero mojado. Pero esa cara. Es… es indescriptible. Me resulta difícil mantener la mirada. Los ojos son negros y brillan como una serpiente. La boca tiene forma de V y derrama saliva de sus labios sin bordes que parecen temblar y latir… La cosa se está levantando. La multitud retrocede. Han visto suficiente. Es la experiencia más extraordinaria. No encuentro palabras. Estoy tirando de este micrófono mientras hablo. Tendré que interrumpir la descripción hasta que haya tomado una nueva posición. Aguarden, por favor, volveré en un minuto.*

Finalmente, el noticiario real tuvo que llamar a la calma y aclarar la razón del pánico en masa.

Hoy somos nosotros quienes estamos «invadiendo» Marte. Hace tiempo que observaciones detalladas revelaron que los canales de Lowell eran sólo efectos ópticos que engañan al ojo humano que ha evolucionado para detectar pautas, uniendo puntos vecinos para hacer líneas siempre que puede. Pese a todo, los canales serpenteantes son reales. A comienzos de 2004 tuvimos pruebas, gracias a la nave espacial *Mars Express*, de que hay agua congelada en el Polo Sur de Marte y que probablemente en tiempos pasados la erosión de corrientes de agua labró grandes canales en su superficie. Quizá a gran profundidad bajo la superficie la presión sobre el hielo es suficientemente grande para mantener agua líquida incluso ahora.

Para los astrónomos, gracias a Marte aprendemos las maravillosas propiedades de la Tierra. Marte no tiene tectónica de placas: su suelo es

simple. Además, a diferencia de la Tierra, Marte no tiene campo magnético. Esto dejó la atmósfera marciana a merced de un viento de partículas eléctricamente cargadas que se mueven a gran velocidad procedentes del Sol. Poco a poco, este viento barrió la atmósfera marciana, sin dejar prácticamente nada detrás. La atmósfera de la Tierra hubiera corrido la misma suerte de no haber existido nuestro campo magnético. Éste desvía el viento incidente de partículas solares alrededor de la atmósfera, de modo que dependemos de él.

Marte tuvo una historia climática mucho más extrema que la Tierra. La razón es de nuevo notable, como acabamos de ver. Tanto la Tierra como Marte rotan con un eje de rotación inclinado aproximadamente 23-24 grados respecto a la vertical al plano de sus órbitas alrededor del Sol. Pero sin el beneficio del efecto estabilizador de una gran Luna e incapaz de mantener su atmósfera, Marte ha estado sometido a esta historia climática caótica, como testimonian las enormes variaciones en hielo y temperatura de su superficie. Sin la Luna, la vida compleja en la Tierra quizá sólo hubiera podido existir, como la de Marte, en las mentes de otros seres y en las páginas de sus libros de ciencia-ficción.

En el futuro nuestras exploraciones del Sistema Solar se centrarán con un énfasis aún mayor en la superficie de Marte. Y, con ello, el aura de Marte se adornará con nuevas imágenes de un mundo que en un tiempo estuvo vivo pero que muere, sembrando quizá vida en la Tierra y desempeñando un último papel en la creación de mundos como la Tierra, que pueden conocerse a sí mismos.

El hombre que fue Jueves. Los orígenes de la semana

Debo de tener una mente prodigiosa; a veces necesito hasta una semana para decidirme.

MARK TWAIN,

Inocentes en el extranjero

El día, el mes y el año son períodos de tiempo llenos de significado celeste. Si, por algún descuido, perdiéramos la cuenta de estos ciclos, no todo estaría perdido. Nuestra medida del tiempo podría ser reinstaurada pronto porque está anclada en las periodicidades de los cielos que, aunque no exactamente constantes, son lo suficientemente constantes durante largos intervalos de tiempo para cualquier fin práctico. Las escalas de tiempo terrestres, lunares y solares dejaron su impronta sobre los moradores de la Tierra de formas que son independientes de la cultura; posteriormente fueron elaboradas y celebradas de acuerdo con la multitud de respuestas culturales al tiempo. Puesto que reflejan periodicidades reales en el ambiente terrestre, crean una variación a la que es posible adaptarse por grados. Nuestros cuerpos llevan el sello de los cambios diarios y mensuales; nuestro mundo refleja la pauta anual del movimiento de la Tierra alrededor de nuestra estrella local y los flujos y reflujos del agua en una danza incesante con la Luna. Pero no todas nuestras divisiones del tiempo se nos imprimen tan directamente desde fuera. Hay aspectos de nuestra experiencia que han sido estructurados indirectamente por nuestra interpretación de los movimientos celestes, más que por dichos movimientos directamente. El más extendido es nuestro hábito de reunir grupos de días en períodos convenientemente pequeños que llamamos semanas. Hoy, una división de siete días es universal, y en muchas lenguas la palabra para semana es simplemente la equivalente a «siete días»[37]. ¿De dónde procede esta ubicua división?

La duración del mes lunar no corresponde a un múltiplo entero de días; pese a todo, hay claramente una influencia astronómica en los días de la semana —Sun-day (día del Sol) y Mo(o)n-day (día de la Luna) son innegablemente celestes— aunque no haya a la vista en los cielos un ciclo de cambio de siete

[37] Por ejemplo, en francés *(semaine),* en español *(semana),* en griego *(hebdomas)* y en hebreo *(shavu'a).*

días exactos. En algunas culturas no occidentales, las «semanas» tenían originalmente longitudes diferentes, y en el pasado algunos regímenes totalitarios occidentales han intentado, sin éxito, redefinir la longitud de la semana. La historia de cómo surgió nuestra semana es curiosa porque muestra una fusión inesperada de dos influencias opuestas. La primera es un intento de resistencia a las influencias celestes sobre los asuntos humanos, mientras que la otra es el abrazo de influencias astrológicas. Veremos que los días de la semana tienen mucho que decirnos sobre los procesos históricos que culminaron en sus nombres actuales.

La más antigua división del tiempo sin ninguna relación con las fases de la Luna fue la de los antiguos egipcios. Como devotos adoradores del Sol, tenían una razón para excluir cualquier influencia lunar de ciertos aspectos de su estructura social. Dividían el año en doce meses de 30 días, cada uno de los cuales se dividía en tres semanas de 10 días, lo que dejaba cinco días especiales para encajar a lo largo del año. Parece que esta división del año en 36 semanas ha tenido básicamente una importancia astrológica; cada semana estaba asociada con una constelación de estrellas particular cuya elevación coincidía con el primer día de la semana.

Si buscamos la fuente de la tradición occidental de la semana de siete días, hay dos hilos, posiblemente entremezclados. Por una parte, está la tradición judía del ciclo de siete días de la creación, que terminaba en el *sabbath* o día de reposo; por otra, encontramos, en Babilonia y Caldea, la aparición de relaciones astrológicas entre los siete planetas antiguos. Ambas fuentes están situadas en la misma región geográfica y podrían derivar de una fuente común anterior. Algunos han argumentado que la tradición del *sabbath* judío y las historias de la creación en el Génesis surgieron durante la época de su exilio en Babilonia, tras la destrucción de Jerusalén en el año 586 a. C. La adopción judía del ciclo de siete días estaba ligada a consideraciones particulares de identidad nacional y teología excluyente. Mientras otras naciones en la región tenían fuertes prácticas astrológicas, e hicieron un

hábito de adorar el Sol y la Luna como divinidades, parece que esta práctica nunca ha aparecido entre los judíos. Para ellos, la adopción de un ciclo temporal que no estaba ligado al Sol ni a la Luna era una manera de rehuir el culto del Sol y la Luna, y reforzar su creencia en el estatus de dichos cuerpos como objetos creados. Ésta fue una parte importante de la evolución de su pensamiento religioso hacia el reconocimiento de Dios como absolutamente otro e irrepresentable por materiales creados. Si el ciclo semanal se hubiera basado en algún otro período (por ejemplo, un cuarto del ciclo de la Luna), entonces la veneración del *sabbath* se hubiera encontrado asociada con un ciclo celeste natural[38].

Aunque ésta fue la manifestación final de la observancia del *sabbath* judío, hay otras huellas bíblicas de un vínculo más antiguo entre el *sabbath* y las fases de la Luna. Hay cuatro pasajes del Antiguo Testamento que sugieren esta conexión. En el primero (Reyes II, 4,26), el marido de la mujer sunamita le pregunta cuándo piensa visitar a Elisha, «¿Por qué vas hoy donde él? No es Luna nueva ni *sabbath».* Puesto que el viaje requiere utilizar un asno, esta pregunta se interpreta en el sentido de que normalmente el asno está disponible sólo en *sabbath,* cuando no se necesita para el trabajo en el campo; por ello se espera que la mujer haga el viaje ese día. Alternativamente, puesto que ella va a buscar al profeta para pedirle ayuda en la curación de su hijo, quizá la Luna nueva o el *sabbath* son tiempos propicios para buscar la intercesión del profeta. En Isaías (1,3) se mencionan

---

[38] Es intrigante que en la quinta tablilla de la historia babilonia de la creación *Enuma elish,* que presenta a la deidad solar Marduk como un padre del mundo creado, y que a veces es comparada con la historia de la creación hebrea, haya un indicio de que la semana está ligada a un cuarto de mes. Dice

Él ha hecho que la Luna brille y le ha confiado la noche.
Le nombró una criatura de la noche para señalar los días:
mensualmente, sin cesar, forma dibujos con una corona.
Al principio del mes, ascendiendo sobre la tierra,
tendrás cuernos luminosos que significan seis días.
El séptimo día tendrás una media corona.
En la Luna llena está en oposición a mitad del mes.
Cuando el Sol te adelante en la base del cielo,
disminuya tu corona y vuelva la noche.

El séptimo día una «media corona» se traduce de diferentes maneras como «media tiara» o «la mitad de tu disco», lo que implica que el ciclo de siete días estaba ligado a la apariencia visual de la Luna cuando pasaba de una forma creciente como una tiara a su forma de media luna. Por desgracia, este indicio de que el mes estuviera dividido en cuatro períodos de siete días no se hace más explícito que esto en el resto del texto.

«la Luna nueva y el *sabbath»* en una lista de observancias religiosas insatisfactorias. En Oseas (2,11), Yahveh lanza una advertencia a Israel: «Haré cesar todo su regocijo, sus fiestas, sus lunas nuevas, sus *sabbaths* y todas sus solemnidades». Y en Amos (8,5), el profeta denuncia a los mercaderes que censuran las restricciones que impone la observancia religiosa sobre su horario, diciendo: «¿Cuándo pasará la Luna nueva, para poder vender el grano, y el sabbath para dar salida al trigo?»

Estas referencias han llevado a afirmar que el *sabbath* puede haber sido originalmente el día de la Luna llena o de la Luna nueva. Más tarde, los judíos tuvieron una fiesta en la Luna nueva, pero no con ocasión de la Luna llena. Esto es compatible con que una temprana celebración de la Luna llena haya sido absorbida y sustituida por la pauta más frecuente de la observancia del *sabbath.* La práctica está prescrita en Números 28: hay que quemar ofrendas al comienzo de cada mes. Superan en mucho el tamaño de las que se requieren en *sabbath.* Pero esto no nos ayuda a decidir si las celebraciones mensuales precedieron a las del *sabbath.* El libro del Génesis no hace mención a ninguna de ellas.

La tradición judía marcaba el ciclo de siete días de la semana por la observancia del *sabbath* como día de reposo y de culto religioso. Con el tiempo, este aspecto de la semana ha llegado a dominar la estructura de las sociedades occidentales. Su testamento más interesante es la cuña que pone entre los asuntos humanos y la estructura de la Naturaleza. Cuando la vida se organiza en torno a un programa creado por el simbolismo humano, está liberada de las restricciones de la Naturaleza y genera cierto espíritu de independencia. Para los hebreos, esta práctica antigua se estableció para reflejar sus creencias sobre la pauta de la creación. Yahveh actuó creativamente durante seis días, y el séptimo descansó. La palabra «sabbath» deriva de *shabath,* que significa «dejar de trabajar», mientras que la palabra hebrea para semana (*shavu' a*) está relacionada con la palabra para siete (*sheva*). El *sabbath* estaba dedicado a Dios y se convirtió en el

fulcro en torno al que giraban todas las actividades sociales y religiosas. Su origen preciso se ha mostrado imposible de apuntar, pero algunos estudiosos han llamado la atención sobre los antiguos registros babilonios de cosas que estaban prohibidas, incluso para el rey, cada siete días; hay una palabra babilonia similar *shabbatum,* o *shappatum,* que significa «el día del resto del corazón», con un significado relacionado con el hebreo. No está claro, sin embargo, si estos tabúes se aplicaban solamente durante meses especiales; tampoco parecen haber sido muy prohibitivos. El examen de un gran número de documentos comerciales babilonios datados revela que no había reducción en el número de transacciones realizadas en esos séptimos días cuando se comparan con los demás. Si había un ciclo babilonio de siete días, tenía una orientación diferente del de los hebreos. La similitud de las palabras hebrea y babilonia para *sabbath* puede apuntar a un origen común para ambas. Muy probablemente dicho origen habría sido el marcar (por celebración o abstinencia) las Lunas nueva o llena, con cuartos intermedios que poco a poco producían observancias menores. Los hebreos adoptaron esta pauta, inyectándole un significado especial para reforzar su solidaridad nacional y su exclusividad frente a la posible dilución por influencia cultural y matrimonios cruzados. De todas formas, una conexión residual con festivales lunares siguió existiendo y reemergió en tiempos en los que decayó su observancia religiosa. Pese a todo, sus observancias deben haber sido muy diferentes de las de los babilonios en la época del exilio, porque ellos se jugaban su identidad nacional y religiosa respecto de los babilonios en la práctica del *sabbath*[39]. Su importancia en el Decálogo, segunda solamente por detrás de sus obligaciones hacia Yahveh, muestra la importancia que se le daba.

---

[39] Muchas sociedades desarrollaron una pauta de días de descanso que estaba ligada a tabúes, a menudo colocados para que coincidieran con cambios estacionales y con las fases de la Luna. Los hawaianos tenían días tabú estrictos en los que no podía encender fuego, guardaban silencio, no botaban canoas, no se bañaban y las personas sólo salían fuera para las observancias religiosas. Debido a la conexión lunar, el sistema utilizado no es diferente del del sabbath, con cuatro períodos tabú en cada mes. Los hawaianos distinguían el período entre las noches 3.ª y 6.ª, la Luna llena (incluyendo las noches 14.ª y 15.ª), las noches 24.ª y 25.ª y las noches 27.ª y 28.ª. No inhabitual encontrar que se practique la abstinencia en el tiempo de las Lunas nueva y llena, y en consecuencia que esos días estén dedicados a alguna deidad.

De hecho, las prácticas astrológicas babilonias se han mostrado tan extendidas como la institución del *sabbath* judío. Nuestra descripción de los días de la semana deriva de las complejidades de dichas creencias y prácticas. Esto se revela en las conexiones obvias entre los nombres de los días de la semana en muchas lenguas europeas y los de los siete antiguos «planetas» —Saturno, el Sol, la Luna, Marte, Mercurio, Júpiter y Venus— mostradas en la Tabla 4.2. En el mundo antiguo, los «planetas», o «errabundos», del cielo incluían al Sol y la Luna, junto con los otros cinco cuerpos del Sistema Solar visibles a simple vista. En las lenguas influidas por el latín podemos ver que muchos de los nombres romanos para los días reflejan los nombres de los antiguos planetas. En otras, como el inglés y el alemán, el proceso de traducción ha adoptado los correspondientes dioses o diosas nórdicos como sustitutos de los correspondientes dioses romanos para los planetas. Así *Thursday* (día de Thor) en inglés, y *Donnerstag (Donarstag,* día de Donar) en alemán han reemplazado a Júpiter, el dios romano del cielo, por Thor o Donar, el dios nórdico del trueno, que a veces es también conocido por Thunar.

Lenguaje	*Saturno*	*Sol*	*Luna*	*Marte*	*Mercurio*	*Júpiter*	*Venus*
Latín	dies Saturni	dies Solis	dies Lunae	dies Martis	dies Mercurii	dies Jovis	dies Veneris
Celta córnico	de Sadarn	de Sil	de Lûn	de Merh	de Marhar	dê Jeu	de Gwenar
Bretón	Disadorn	Disul	Dilun	Dimeurz	Dimerc'her	Diriaou	Digwener
Galés	dydd Sadwrn	dydd Sul	dydd Llun	dydd Mawrth	dydd Mercher	dydd Iau	dydd Gwener
Gaélico	Di-sathuirne		Di-luain	di Màirt			
Catalán			Dilluns	Dimarts	Dimecres	Dijous	Divendres
Francés			Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Italiano			Lunedi	Martedi	Mercoledi	Giovedi	Venerdi
Español			Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Rumano			Lunî	Martî	Miercurî	Joî	Vinerî
Inglés	Saturday	Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday
Sueco		Söndag	Måndag	Tisdag	Onsdag	Torsdag	Fredag
Danés		Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Fredag
Noruego		Søndag	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Fredag
Islandés		Sunnundagur	Mánudagur				
Finés		Sunnuntai	Maanantai	Tiistai		Torstai	
Sami			Manodag	Tisdag		Tuoresdag	
Holandés	Zaterdag	Zondag	Maandag	Dinsdag	Woendag	Donderdag	Vrijdag
Alemán		Sonntag	Montag	Dienstag		Donnerstag	Freitag
Albanés	e Shtunë	e Dielë	e Hënë	e Martë	e Mërkurë	e Enjte	e Prëmtë

TABLA 4.2. Palabras que designan los días de la semana que tienen una raíz astronómica en varias lenguas euro-peas. Véase también la Figura 4.7.

En todas estas lenguas vemos la correspondencia directa entre los días de la semana y los siete antiguos planetas en el corazón de la interpretación astrológica, en lugar de la correspondencia con los días de la historia hebrea de la creación que culminó en la institución del *sabbath.* El sistema astrológico babilonio y caldeo atribuía a cada uno de los cuerpos celestes que «erraban» entre las estrellas un dios que controlaba aspectos de los asuntos

humanos. Podemos encontrar una asociación explícita de planetas con días en los antiguos horóscopos babilonios que datan de aproximadamente el 410 a. C. La posterior llegada al sistema actual, y la forma en que se ordenan los nombres de los planetas en nuestra secuencia de días bautizados, es más evidente, aunque curiosamente elaborada. En el siglo II a. C. se estableció un ordenamiento convencional de los siete cuerpos planetarios. Fue dictado según la jerarquía de sus velocidades en los cielos. Los que se mueven a más velocidad tenían los períodos orbitales más cortos cuando se ven desde la Tierra (recordemos que se suponía que todos estos cuerpos, incluido el Sol, describían órbitas alrededor de la Tierra). Esto da la siguiente secuencia descendente (con sus períodos aproximados con relación a la Tierra entre paréntesis):

Saturno (29 años)
Júpiter (12 años)
Marte (687 días)
Sol (365 días)
Venus (225 días)
Mercurio (88 días)
Luna (27 días)

Cabría esperar que este ordenamiento dictara la secuencia de días. Si así fuera, la pauta sería sábado, jueves, martes, domingo, viernes, miércoles, lunes. Pero la secuencia real es diferente. Se obtiene empezando un día cualquiera y saltando luego los planetas de tres en tres para obtener el día siguiente. Por ejemplo, partiendo del sábado nos saltamos jueves y martes para obtener domingo, luego saltamos viernes y miércoles para obtener lunes; luego (volviendo a empezar) saltamos sábado y jueves para llegar a martes, y así sucesivamente, hasta que se han agotado los siete días y regresamos al sábado.

El índice de una obra del historiador Plutarco, que data del año 100 d. C., cita una obra suya titulada *¿Por qué los días nombrados según los planetas siguen un orden diferente del orden real?,* pero esta obra se ha perdido. Una discusión posterior por parte del historiador romano Dión Casio habla de una práctica astrológica que probablemente tuvo su origen en Alejandría. La doctrina de las «cronocracias» asignaba cada una de las veinticuatro horas del día a uno de los siete dioses planetarios. El dios que controlaba la primera hora del día tenía también la distinción añadida de ser nombrado «regente» controlador del día. Se creía que la vida de cada persona estaba controlada, hora a hora, por la deidad adecuada, o «cronócrata», bajo la égida del regente que gobernaba ese día.

Estas dos creencias astrológicas son las que determinaron nuestra secuencia de días. Había veinticuatro horas en cada día, y siete dioses asociados con los siete planetas. La primera hora del primer día sería asignada a Saturno, el planeta más alejado. Cada hora subsiguiente se asignaba entonces a los planetas de acuerdo con sus períodos orbitales descendentes. Saturno-Júpiter-Marte-Sol-Venus-Mercurio-Luna-Saturno-Júpiter-Marte-Sol... y así sucesiva e indefinidamente. Pero puesto que 24 no es exactamente divisible por 7 (deja un resto de 3), la vigésimo quinta entrada en la secuencia, que se asigna a la primera hora del segundo día, es el Sol; la cuadragésimo novena entrada, que marca la primera hora del tercer día, es la Luna; la septuagésimo tercera entrada, que marca la primera hora del cuarto día, es Marte; la primera hora del quinto día es Mercurio, la primera del sexto es Venus, y la primera hora del séptimo día vuelve de nuevo a Saturno. La secuencia de planetas asignados como regentes para la primera hora que controla cada día de veinticuatro horas da el orden de los días de la semana astrológica, que mantenemos hasta hoy. Sábado-domingo-lunes-martes-miércoles-jueves-viernes, y así cíclicamente, como se muestra en la Tabla 4.3.



1 *SATURNO*
2 Júpiter
3 Marte
4 Sol
5 Venus
6 Mercurio
7 Luna
8 Saturno
9 Júpiter
10 Marte
11 Sol
12 Venus
13 Mercurio
14 Luna
15 Saturno
16 Júpiter
17 Marte
18 Sol
19 Venus
20 Mercurio
21 Luna
22 Saturno
23 Júpiter
24 Marte

1 *SOL*
2 Venus
3 Mercurio
4 Luna
5 Saturno
6 Júpiter
7 Marte
8 Sol
9 Venus
10 Mercurio
11 Luna
12 Saturno
13 Júpiter
14 Marte
15 Sol
16 Venus
17 Mercurio
18 Luna
19 Saturno
20 Júpiter
21 Marte
22 Sol
23 Venus
24 Mercurio

1 *LUNA*
2 Saturno
3 Júpiter
4 Marte
5 Sol
6 Venus
7 Mercurio
8 Luna
9 Saturno
10 Júpiter
11 Marte
12 Sol
13 Venus
14 Mercurio
15 Luna
16 Saturno
17 Júpiter
18 Marte
19 Sol
20 Venus
21 Mercurio
22 Luna
23 Saturno
24 Júpiter

1 *MARTE*
2 Sol
3 Venus
4 Mercurio
5 Luna
6 Saturno
7 Júpiter
8 Marte
9 Sol
10 Venus
11 Mercurio
12 Luna
13 Saturno
14 Júpiter
15 Marte
16 Sol
17 Venus
18 Mercurio
19 Luna
20 Saturno
21 Júpiter
22 Marte
23 Sol
24 Venus

1 *MERCURIO*
2 Luna
3 Saturno
4 Júpiter
5 Marte
6 Sol
7 Venus
8 Mercurio
9 Luna
10 Saturno
11 Júpiter
12 Marte
13 Sol
14 Venus
15 Mercurio
16 Luna
17 Saturno
18 Júpiter
19 Marte
20 Sol
21 Venus
22 Mercurio
23 Luna
24 Saturno

1 *JÚPITER*
2 Marte
3 Sol
4 Venus
5 Mercuio
6 Luna
7 Saturno
8 Júpiter
9 Marte
10 Sol
11 Venus
12 Mercurio
13 Luna
14 Saturno
15 Júpiter
16 Marte
17 Sol
18 Venus
19 Mercurio
20 Luna
21 Saturno
22 Júpiter
23 Marte
24 Sol

1 *VENUS*
2 Mercurio
3 Luna
4 Saturno
5 Júpiter
6 Marte
7 Sol
8 Venus
9 Mercurio
10 Luna
11 Saturno
12 Júpiter
13 Marte
14 Sol
15 Venus
16 Mercurio
17 Luna
18 Saturno
19 Júpiter
20 Marte
21 sol
22 Venus
23 Mercurio
24 Luna

1 *SATURNO*

TABLA 4.3. La secuencia babilónica de los días planetarios. La secuencia de siete «planetas» va en orden decreciente de su período orbital en el cielo y por lo tanto empieza con Saturno. El «planeta» que cae en la primera hora de cada día sucesivo es designado gobernante astrológico de dicho día, y la -secuencia siguiente de siete gobernantes diarios genera el orden de los días en la semana astrológica que todavía utilizamos hoy.

El desarrollo primitivo de las semanas judía y astrológica fue independiente después de los posibles puntos de contacto en su nacimiento. Pero su

período común de siete días aseguraba que con el tiempo se fusionarían en un sistema común distinguido solamente por el significado atribuido a días concretos. En el siglo I d. C. había una conexión entre el *sabbath* y el día de Saturno. Es interesante que la fuerza de la tradición del sabbath judío se manifiesta en el hecho de que los hebreos llamaban *Shabtai* al planeta Saturno, por la palabra hebrea original para el *sabbath.* Así, la práctica astrológica de llamar a los días según los planetas se invirtió en este único caso. Pese a todo, la semana astrológica se difundió a todas partes desde Alejandría en el siglo II a. C. Los imperios de Alejandro Magno y de los romanos reunieron a las grandes culturas en torno al Mediterráneo y el Asia occidental. Todas estas culturas estaban relacionadas por la astrología y rápidamente adoptaron el patrón de la semana astrológica. Esta tradición fue finalmente asumida por la Cristiandad y el Islam, y se difundió con sus conversos. Pero la astrología se difundió más rápidamente a través del Imperio Romano que de la Cristiandad, y caló tan fuerte que, incluso cuando se adoptó el cristianismo, no había ninguna esperanza de renombrar los días de la semana para desligarlos de su origen pagano. Es interesante señalar que la asignación astrológica de los días de la semana sigue completa en lenguas como el galés, inglés y holandés, que se hablaban en los márgenes del Imperio Romano, y por ello estaban entre los últimos en sentir la influencia cristiana durante los primeros siglos después de Cristo. Por el contrario, las lenguas habladas cerca del corazón del imperio, donde la influencia de la Cristiandad se extendió rápidamente y con más fuerza, reflejan el deseo de expresar aspectos de la religión cristiana al reemplazar los nombres astrológicos de los días con otros nuevos de significado religioso (Figura 4.17 y Tabla 4.2).

El ejemplo más evidente de esto es la eliminación de cualquier asociación entre nuestro domingo y el Sol. Este día se había convertido en el primer día de la semana para los creyentes cristianos que, si eran también judíos, le dotaban, como al *sabbath* (sábado), de un estatus especial. Su importancia

religiosa deriva de que era el día en el que tuvo lugar la Resurrección —y de aquí su posterior descripción en la Iglesia Primitiva como «El Día del Señor»—. En latín, esto se traduce directamente como *dies Dominica*, y de ahí en italiano (como *domenica),* francés (como *dimanche*), español y portugués (como *domingo),* y análogamente en muchas otras lenguas. En algunas lenguas, como el ruso, la palabra para domingo es simplemente «resurrección» (*voskresénie*). Del mismo modo, la influencia del *sabbath* judío puede encontrarse en otras lenguas, desplazando el día de Saturno con *sabbato* en griego, con *sabato* en italiano y con *samedi* en francés.

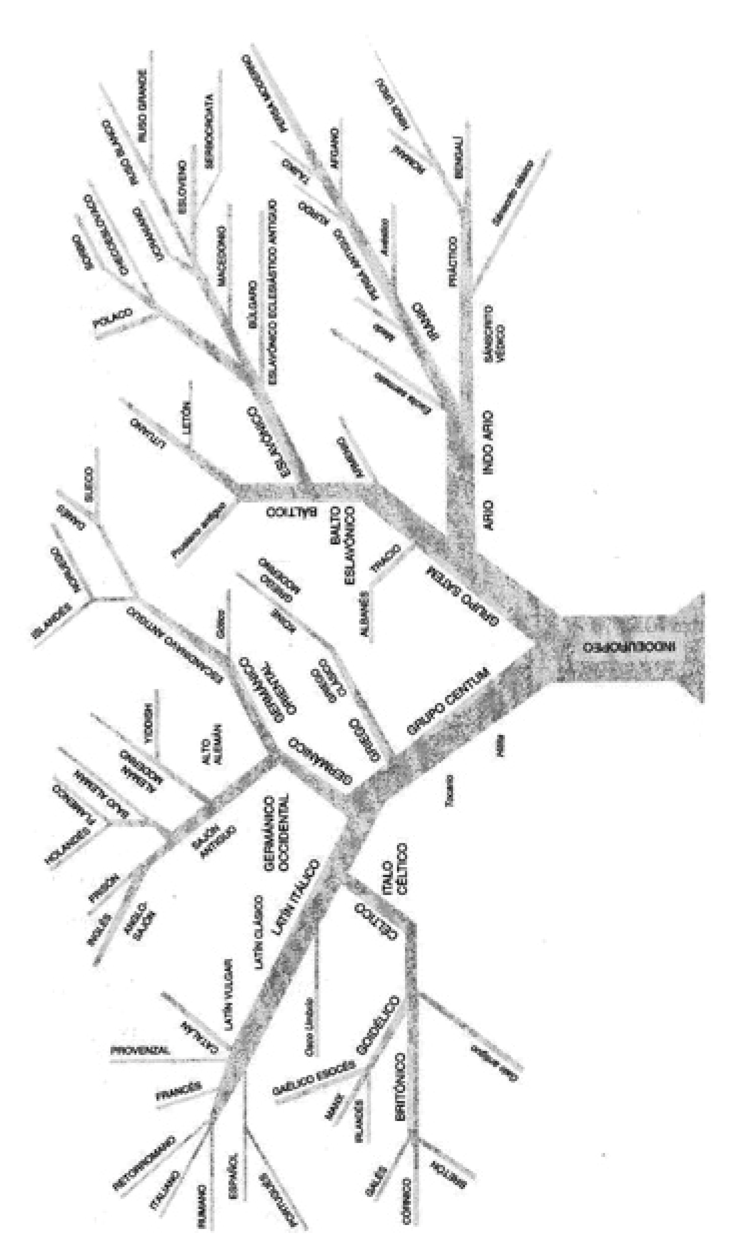


Figura 4.17. El árbol evolutivo de las lenguas indoeuropeas.

La observancia dual de sábado y domingo en el mundo judeocristiano terminó oficialmente alrededor del año 360, cuando cesó la observancia del *sabbath.* La decisión de la Iglesia Cristiana de mantener una identidad separada fijando su día de descanso particular en el domingo, para distinguirlo del *sabbath* judío, muestra la importancia de las identidades de calendario para los movimientos religiosos. La misma tendencia se encuentra en la fundación del Islam. Mahoma escogió el viernes como día sagrado de la

semana, copiando presumiblemente la característica encontrada en el judaísmo y la cristiandad. La difusión del Islam en África y Asia conllevó la estructura de siete días de la semana astrológica. Así, seguimos encontrando una difundida diferencia de los días viernes, sábado y domingo en todo el mundo occidental, y en las regiones coloniales del Nuevo Mundo, que refleja las influencias formativas de las tradiciones islámica, judía y cristiana. Una de las cosas más sorprendentes (y frustrantes) para cualquiera que visite Jerusalén es la confluencia de estas religiones en los diversos barrios de la ciudad vieja. Diferentes monumentos e iglesias abren y cierran con ciclos diferentes, y la ciudad entera parece trabajar durante sólo cuatro días a la semana. Recuerdo que me dijeron que éste era un factor que siempre frenaba el ritmo de las negociaciones árabe-israelíes.

La característica más interesante del día sagrado es su influencia sobre los asuntos sociales y civiles. Cada vez que un Estado ha pensado en erradicar la influencia religiosa, ha apuntado al patrón de la semana, y con ello al día sagrado distinguido, sin el cual la comunidad de practicantes de la religión quedaría desorganizada y debilitada. Ha habido en la historia europea dos ejemplos espectaculares, aunque en última instancia infructuosos, de Estados en guerra con las tradiciones religiosas. El primero fue el plan francés, entre 1792 y aproximadamente 1799, para decimalizar el tiempo. Tras la Revolución Francesa de 1789, hubo un deseo de cambio revolucionario en otras áreas de la vida. Científicos y matemáticos franceses habían creado el sistema métrico de pesas y medidas que aún utilizamos hoy. Otros vieron esto como una oportunidad de promover la decimalización del tiempo, introduciendo una división de cada mes en tres ciclos de diez días llamados «décadas»[40]. Esto dejaba el año con cinco días especiales, a tomar tras el último mes del verano, junto con un sexto día cada año bisiesto. El sistema es similar al que se adoptó en el antiguo Egipto, que

---

[40] Los documentos oficiales empezaron a utilizar nuevos nombres para los diez días en el ciclo decádico: *primidi, duodi, tridi, quartidi, quintidi, sextidi, sepredi, octidi, nonidi, décadi.*

mencionamos antes. Para consolidar el calendario revolucionario de la nueva República Francesa se renombraron los doce meses, utilizando nombres que describían una típica característica climática o actividad agrícola del mes.

El nuevo «Calendario Revolucionario» fue introducido por decreto oficial el 24 de noviembre de 1793. Se sugirió una decimalización adicional para dividir cada día en diez horas decimales de cien minutos decimales, cada uno de una duración de cien segundos decimales. Esta reforma se propuso con la intención de sustituir la lógica astrológica en el corazón de la semana de siete días. Además, se estableció que el nuevo calendario no debería parecerse al utilizado por la Iglesia Católica Romana u otras iglesias apostólicas. Parece que uno de sus objetivos fue la abolición de la observancia religiosa del domingo. El conflicto posterior entre la Orden Católica de los Dominicos (que recibe su nombre del latín *dies dominica* o «el día del Señor») y los «decadistas» fue una consecuencia de este propósito. La oposición a la observancia del domingo se hizo draconiana durante el Reino del Terror, cuando se prohibió el cierre de los negocios, la vestimenta especial del domingo y la apertura de las iglesias en el domingo del viejo ciclo de siete días. En 1794, Robespierre intentó instaurar una nueva religión estatal dedicada al culto del Ser Supremo cada *décadi.* Su objetivo era alterar el centro de gravedad de la vida francesa y reemplazar la influencia de la Iglesia por la del Estado. Sin embargo, tras alcanzar su cénit en 1798, toda la empresa se desintegró poco a poco, y era prácticamente inexistente a finales del siglo XVIII[41]. Su fracaso fue reconocido oficialmente por la reinstauración oficial por Napoleón de la semana de siete días, junto con el domingo como día de descanso, en septiembre de 1805. Se readoptó el calendario gregoriano, ya en uso en Gran Bretaña y Norteamérica, y aún utilizado hoy universalmente.

---

[41] Otra dificultad surgió de la adopción del día del equinoccio de otoño en París como primer día del año. Esto habría llevado a discrepancias con otros sistemas astronómicos, porque la iniciativa francesa no fue asumida por las demás naciones.

El otro intento notable de reformar la semana fue la institución de Stalin de la «semana de producción ininterrumpida» en la Unión Soviética en 1929. Aquí había un doble propósito. Uno era evitar un día perdido por semana, en el que toda la maquinaria quedaría ociosa y cesaría toda la producción; el otro era romper la pauta de vida familiar y comunitaria de tal modo que fuera imposible mantener la observancia religiosa tradicional. Stalin se propuso conseguir estos objetivos introduciendo un ciclo de cinco días con cuatro días de trabajo seguidos de un día de descanso. El ciclo no era el mismo para todos. Los días de reposo estaban escalonados a lo largo de la población, de modo que factorías y granjas estaban constantemente en producción, con un 80 por 100 de la población trabajando, y el 20 por 100 descansando, cada día. Al principio, cada uno de los días de la nueva semana de producción fue etiquetado con un número, pero los números fueron pronto reemplazados por colores. Los individuos empezaron a etiquetar a sus amigos, familiares y conocidos por sus «colores». La sociedad se fragmentó en cinco subsociedades cromáticas. Los «amarillos», que tenían su día libre el primer día de la semana, sólo podían socializar con otros amarillos. Las familias se fragmentaron porque se asignaban diferentes días de descanso a diferentes miembros de la misma familia. Los intentos de observancia religiosa fueron cortados por la falta de oportunidades que tenían familias, o comunidades enteras, para reunirse el mismo día.

A pesar de la atención de las autoridades, la «semana de producción ininterrumpida» degeneró con el tiempo en producción débil ininterrumpida. Los trabajadores cuyos deberes, amigos y responsabilidades estaban compartimentados en un único día empezaron a valorar muy poco su trabajo. La ausencia de trabajadores clave que eran necesarios para mantener el equipamiento resultó catastrófica para el objetivo de la producción continua. En 1931, las tensiones internas se estaban agudizando, y Stalin suspendió la reforma, echando la culpa a la irresponsabilidad de los trabajadores y prometiendo la reintroducción de la semana de producción

tras un proceso de reexamen y reeducación. Pero nunca se reintrodujo, y la idea general murió por decreto suyo dos años más tarde. Sin embargo, para resaltar el conflicto con la tradición religiosa, no fue reemplazada por la semana de siete días tradicional. En su lugar, dio paso a una semana de seis días —aunque con un único de descanso universal—. Este esquema encontró una resistencia que se hacía más fuerte cuanto más lejos estaba de los centros de gobierno. Las comunidades campesinas siguieron con su ciclo de siete días donde era posible, y finalmente el Estado cedió, reinstaurando el ciclo de siete días con el tradicional «día de resurrección» como día de descanso el 26 de junio de 1940.

Estas batallas por la semana de siete días y su día de observancia religiosa son instructivas. Muestran la fuerza de la tradición cultural para ordenar nuestras vidas. La historia muestra que la estructuración de los días en un ciclo semanal permite que las creencias religiosas establezcan su identidad mediante el artificio de santificar días concretos, o introducir una práctica particular en días concretos (por ejemplo, la antigua tradición Católica Romana de abstenerse de comer carne los viernes). Habría que recordar que no hay ninguna necesidad astronómica de que el ciclo de días sea séptuple. Si entramos en culturas de África, Asia y las Américas que estaban fuera de la esfera de influencia de la primitiva tradición judía y de la astrología mesopotámica, encontramos «semanas» de otras longitudes. En África y América Central, el ciclo semanal se suele estructurar en torno a las comunidades agrícolas y el comercio. El día de mercado es el día más importante, y el ciclo semanal de la vida gira en torno a él. En algunas partes de África la palabra para «semana» es la misma que para mercado. Otra característica interesante de la longitud de los ciclos semanales en algunas civilizaciones no occidentales es su conexión con la base del sistema de recuento utilizado[42]. Ejemplos característicos se encuentran en América

[42] Puede encontrarse una exposición detallada de la naturaleza, diversidad y evolución de los diferentes sistemas de recuento en mi libro *La trama oculta del Universo.*

Central y del Sur, donde abundaban sistemas de recuento basados en 20 (el número de dedos de las dos manos más los dedos de los dos pies), en lugar de nuestro propio sistema «decimal» basado en 10 (el número de dedos de las dos manos). Tanto los mayas como los aztecas empleaban sistemas de recuento de base 20 y ciclos temporales de 20 días para definir sus semanas; los mayas decidieron dividir su año en 18 semanas de 20 días y 5 días especiales adicionales.

Nos hemos detenido en los orígenes de la semana porque es una institución social extendida cuya *raison d'être* es desconocida para la mayoría de la gente, aunque domina la pauta de nuestra vida diaria. Su fuente es más sutil que la del día, el año o las estaciones, y su papel en la estructuración de la identidad religiosa es sorprendente; combina huellas de orígenes lunares, pero su forma presente pone de manifiesto la antigua influencia de la astrología como forma de organizar la percepción humana de los sucesos en los cielos. Los astrónomos modernos no encuentran ninguna prueba de conexión astrológica entre las estrellas y las actividades humanas; pero, en cualquier caso, el hecho de que dicha conexión fuera ampliamente creída en el pasado fue razón suficiente para establecer la pauta de las actividades humanas y determinar los nombres de los días de la semana en las culturas occidentales. Una vez más, casi inadvertida, hemos encontrado la impronta de los cielos en nuestras maneras de ser, aunque sea de forma indirecta; esta vez, a través del deseo de nuestros predecesores de dotar de significado a sus movimientos y de relacionar el avance del tiempo en la Tierra con la voluntad de los dioses.

Larga jornada hacia la noche. El origen de las constelaciones

Todos estamos en la cuneta, pero algunos de nosotros estamos mirando a las estrellas.

OSCAR WILDE,

El abanico de Lady Windermere

Hay una parte de la astronomía que todo el mundo conoce. Para algunos, influye en su vida. Hablamos, por supuesto, de las constelaciones: el material de la mitología, los horóscopos y todo eso. La influencia de la astrología en la historia humana ha sido tan grande como la de cualquier otra idea, y los asuntos de algunas naciones aún están influidos de forma importante por proyecciones astrales. Las razones para la aparición de la astrología en el mundo antiguo no se conocen con certeza, y probablemente difieren de una civilización a otra. Los egipcios creían que las estrellas eran otro mundo donde descansaban nuestros espíritus después de la muerte. El diseño y la disposición de las pirámides estaban íntimamente correlacionados con las posiciones de las estrellas en los campos estelares próximos, en un intento de recrear el plan terrenal de la otra vida aquí en la Tierra. Puesto que los movimientos celestes controlan las horas de luz diurna, las mareas y las estaciones, no es completamente antinatural creer que controlan también todo lo demás. Tales supersticiones sobre las pautas de las estrellas han persistido durante muchos miles de años. Las personas parecen tener una inclinación natural a creer que el curso de sus vidas está determinado por fuerzas externas y a identificar pautas invisibles tras las apariencias. Pese a todo, estas mismas imágenes que los antiguos proyectaban en el cielo para ayudarles a identificar grupos especiales de estrellas servían a un fin práctico. La lenta variación en la apariencia del cielo ofrecía a las civilizaciones duraderas formas sofisticadas de seguir el curso del tiempo. Y más importante desde el punto de vista cotidiano era el uso del cielo nocturno como ayuda a la navegación. Esto es esencial para las naciones marineras. Mientras que los viajeros terrestres pueden detenerse a salvo cuando cae la luz y los puntos de referencia se hacen invisibles, los marineros no pueden hacerlo.

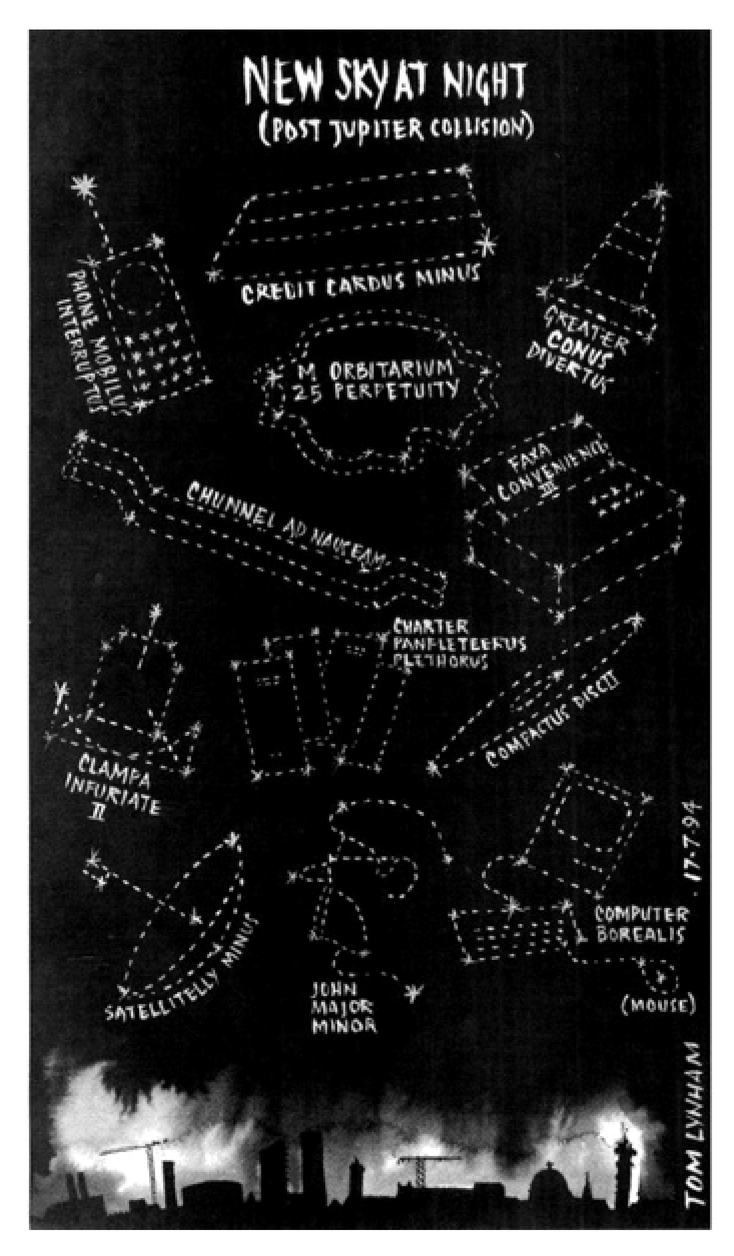


Figura 4.18. Una versión contemporánea de las constelaciones de Tom Lynham, tomada del Observer.

Muchos mitos peculiares son simplemente reglas mnemotécnicas para identificar la disposición de grupos de estrellas concretos. Las constelaciones tienen nombres que fueron escogidos por otras culturas antiguas, que les adscribían sus propias imágenes. Hoy, no dudaríamos en hacer elecciones diferentes (véase la Figura 4.18). Pero ¿de dónde procedían las constelaciones originales? ¿Quiénes crearon esta variedad en el cielo oscuro

nocturno? ¿Cuándo lo hicieron? ¿Y por qué? Irónicamente, al responder a estas preguntas descubriremos que las constelaciones pueden decirnos algo sobre el pasado, incluso si no pueden predecir el futuro.

Podemos precisar cuándo, y dónde, vivían los que idearon las constelaciones recordando que el eje de la Tierra precede cuando ésta gira, como una peonza que cabecea, de modo que el eje polar traza un círculo en el cielo cada 26 000 años. Si consideramos un observador en la Tierra, situado como en la Figura 4.19, el horizonte del observador divide el cielo por la mitad. Sólo la parte del cielo por encima del horizonte es visible en cualquier momento. Si la latitud del observador es de *L* grados norte, entonces el Polo Norte celeste está situado a *L* grados por encima del horizonte, y el Polo Sur lo está a *L* grados por debajo del mismo. La rotación de la Tierra hace que el cielo parezca rotar hacia el oeste en torno al Polo Norte celeste. Las estrellas se levantan en un punto oriental del horizonte, luego ascienden en el cielo antes de alcanzar su punto más alto, después de lo cual descienden para ponerse en un punto del horizonte occidental. La mayoría de las estrellas siguen esta pauta, con estaciones de visibilidad seguidas de estaciones de invisibilidad. Por ejemplo, desde Gran Bretaña y desde gran parte de Europa septentrional podemos ver Orión y Sirio en invierno, pero no durante el verano.

Hay dos grupos de estrellas que no siguen esta pauta de salida y puesta nocturna. Las estrellas dentro de un círculo que se extiende *L* grados desde el Polo Norte celeste nunca desaparecen por debajo del horizonte. Pueden verse siempre si el cielo está claro. Se denominan estrellas circumpolares del norte. Para los observadores europeos incluyen la Osa Mayor y Casiopea. Por la misma razón, hay un grupo de estrellas circumpolares del sur dentro de una región circular de la misma extensión angular alrededor del Polo Sur. Nunca las ve el observador de nuestra figura, porque nunca se levantan sobre su horizonte. Así, la Cruz del Sur no puede verse desde Europa septentrional, incluso si es visible en Tasmania. El tamaño de estas regiones

siempre visibles y nunca visibles, y con ello el número de estrellas abarcadas por ellas, varía con la latitud del observador. Cuanto mayor es la latitud, mayores son las regiones circumpolares del cielo, como puede verse en la Figura 4.19.

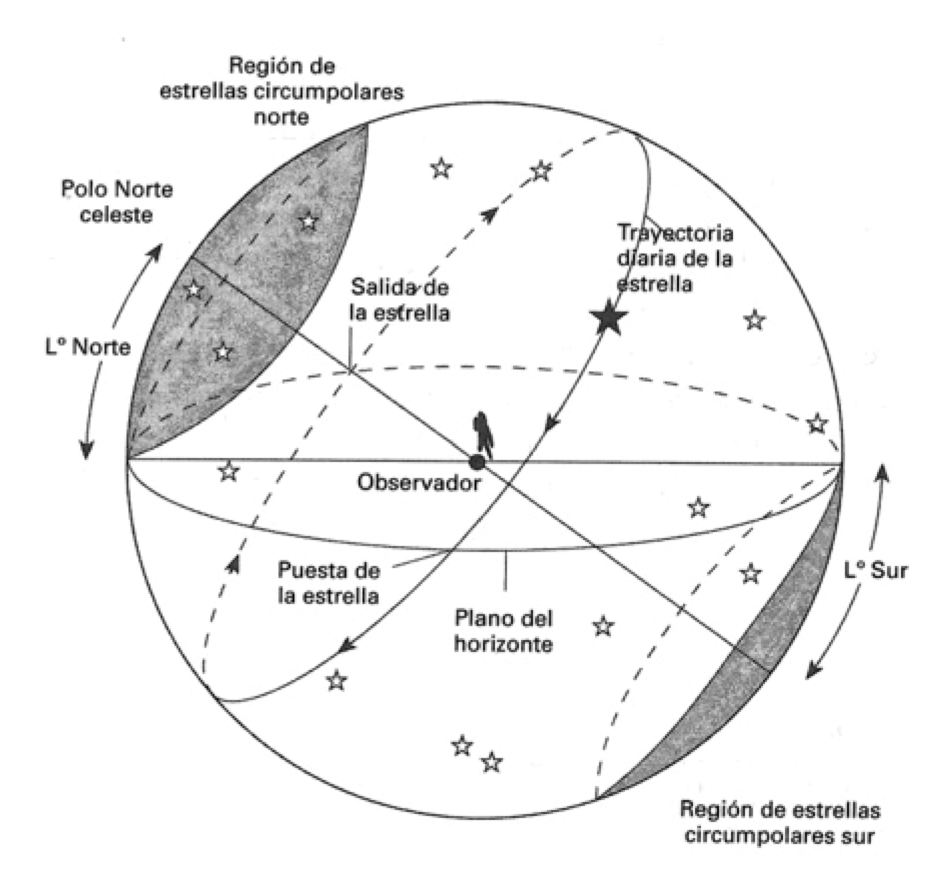


Figura 4.19. La esfera celeste. El observador está situado a una latitud de L grados norte. Sólo la mitad de la esfera celeste es visible para el observador en cualquier momento. Algunas estrellas están tan próximas al Polo Norte celeste que nunca desaparecen bajo el horizonte. Son las estrellas circumpolares. Un segundo grupo de estrellas, llamadas estrellas circumpolares sur, nunca son vistas por el observador porque no se levantan por encima del horizonte. Véase también la Figura 4.13 en p. 245.

El camino anual del Sol puede superponerse a esta imagen. Como ya hemos visto al discutir las estaciones, el eje de rotación de la Tierra está inclinado

con respecto al plano de su órbita alrededor del Sol. Así, desde una perspectiva terrestre, el Sol traza en la esfera celeste un círculo máximo que está inclinado hacia el ecuador celeste, como se muestra en la Figura 4.20.

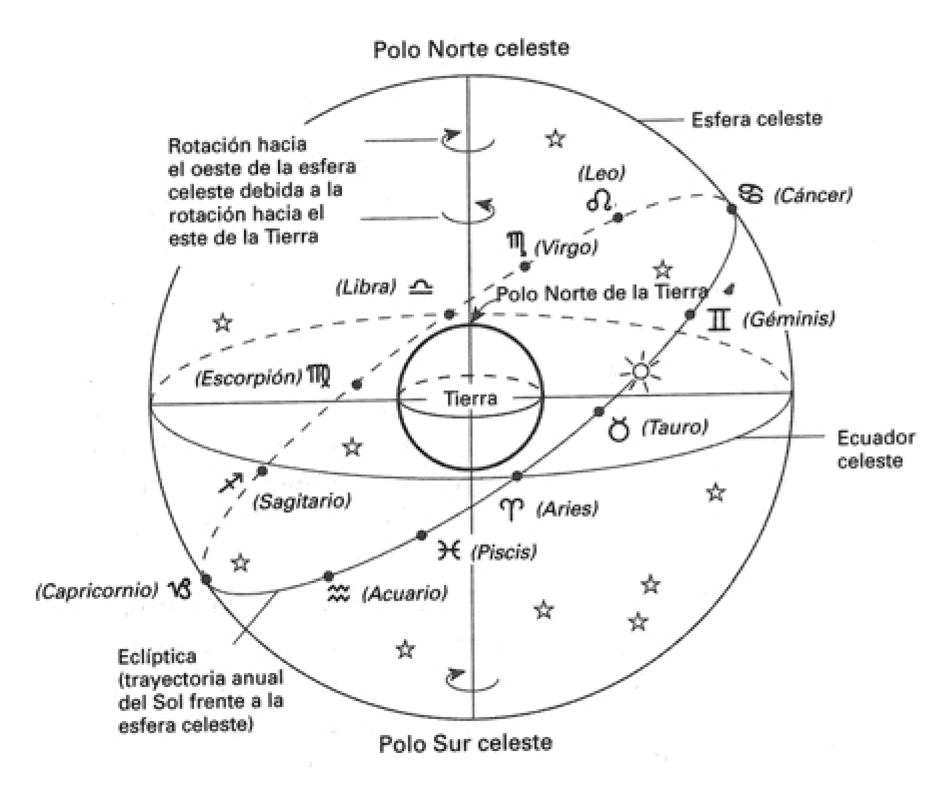


Figura 4.20. Trayectoria del Sol en la esfera celeste. Su trayectoria anual es un círculo máximo llamado eclíptica. Los antiguos dividieron la eclíptica en doce constelaciones, las denominadas casas del zodiaco, para representar gráficamente la trayectoria del Sol.

Este camino en la esfera celeste estaba dividido en tiempos antiguos en los doce signos, o «casas» del zodiaco, por las doce constelaciones por las que pasaba el Sol por orden en su viaje anual alrededor de la Tierra. (Recordemos que, en tiempos antiguos, se creía que la Tierra estaba en el centro del sistema solar). Estos doce signos se siguen utilizando hoy en las columnas astrológicas de las revistas populares. De hecho, los signos del zodiaco difieren de las constelaciones del zodiaco, incluso si comparten los

mismos nombres. Las constelaciones son grupos destacados de estrellas que tienen una forma fácil de advertir. Tienen diferentes tamaños y contienen diferentes números de estrellas. Los signos del zodiaco, por el contrario, son sectores de la eclíptica del mismo tamaño: cada uno de los doce signos cubre una zona de 30 grados (de modo que el total, 360 grados, cubre todo el círculo), y por convenio se toman de 18 grados de anchura. Inicialmente, había una clara correspondencia aproximada entre cada signo y la constelación que llevaba el mismo nombre. Pero había muchas más constelaciones antiguas tradicionales que signos del zodiaco, y cabe especular que en esto vemos prueba de dos hilos de invención que con el tiempo se entremezclaron. Aunque los fines astrológicos podían satisfacerse con una neta división en doce partes, las necesidades de la navegación podían ser menos predecibles y cambiar con el tiempo. De esta manera, podrían ser necesarias adiciones al esquema astrológico y, una vez hechas, serían duraderas.

La dirección del polo celeste cambia lentamente, trazando en el cielo un círculo de un radio angular de 23,5 grados cada 26 000 años. Como ya se ha dicho, la dirección de este polo se hace aparente como el eje alrededor del cual giran todas las estrellas. Así, en el pasado lejano los observadores de estrellas habrían visto una dirección diferente de la que vemos hoy como centro de las estrellas giratorias. Si encontramos un registro antiguo de observaciones detalladas del cielo, la fecha de su autoría puede calibrarse aproximadamente viendo qué estrella se está utilizando como indicador más próximo al Polo Norte celeste. Hoy, esa estrella es Polaris, pero en el 3000 a. C. habría sido Alpha Draconis. Conociendo estas características del variable cielo nocturno, los astrónomos han tratado de descubrir quién «creo» las constelaciones antiguas. El método es simple. Si examinamos la pauta antigua de las constelaciones con nombre en los hemisferios septentrional y austral, mostrada en la Figura 4.21, encontramos que hay una región del cielo austral que está vacía de constelaciones antiguas.

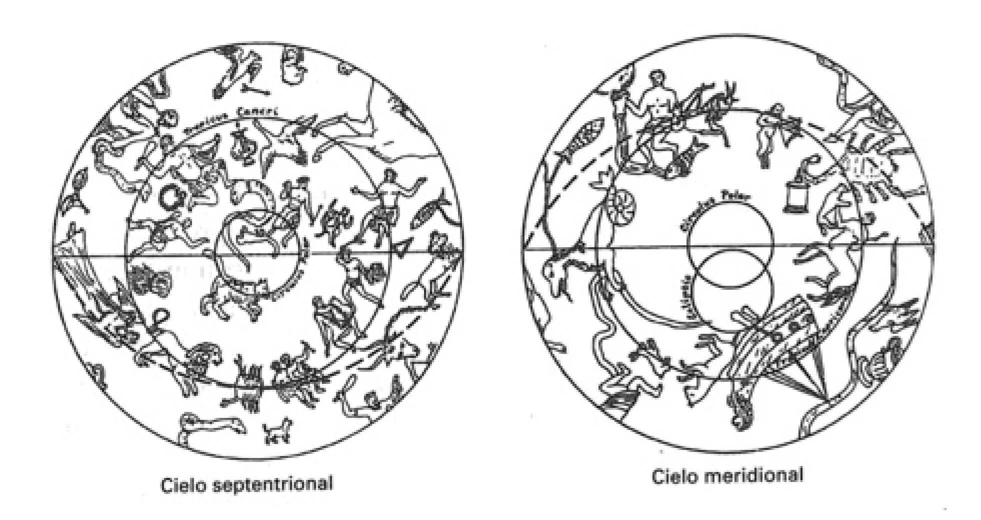


Figura 4.21. Las constelaciones antiguas de los cielos septentrional y austral.

Los atlas estelares modernos muestran que esta región se ha llenado con adiciones hechas durante los últimos siglos[43]. (En las Láminas 18 y 19 se muestran dos bellos mapas coloreados a mano del cielo medieval cristianizado, dibujados por Andreas Cellarius en 1660). Mirando de nuevo la Figura 4.19, vemos que este estado de cosas es de esperar. Un observador en una latitud *L* grados norte no puede ver un disco circumpolar de estrellas de un diámetro angular de 2*L* grados, centrado en el Polo Sur celeste. Así, el tamaño de la región vacía de constelaciones antiguas nos dice algo sobre la latitud en la que vivían quienes hicieron las constelaciones. El diámetro de la zona vacía en el cielo subtiende aproximadamente 72 grados, de modo que quienes hicieron las constelaciones deberían encontrarse próximos a una latitud de 36 grados norte. También podemos datarlos. La región vacía no está centrada alrededor del Polo Sur celeste actual, ni esperaríamos que lo estuviera: la lenta precesión de la dirección del Eje polar en el cielo lo rota en un ciclo de 26 000 años. Deberíamos esperar que la zona vacía esté

[43] Por ejemplo, Hidra, la serpiente de agua, y el Camaleón fueron ideadas por dos navegantes holandeses del siglo XVI, Frederick de Houtman y Pieter Dirkszoon Keyser, para llenar el espacio vacante en el cielo cerca del Polo Sur celeste.

centrada en la dirección del polo celeste en la época que estaban observando quienes hicieron las constelaciones.

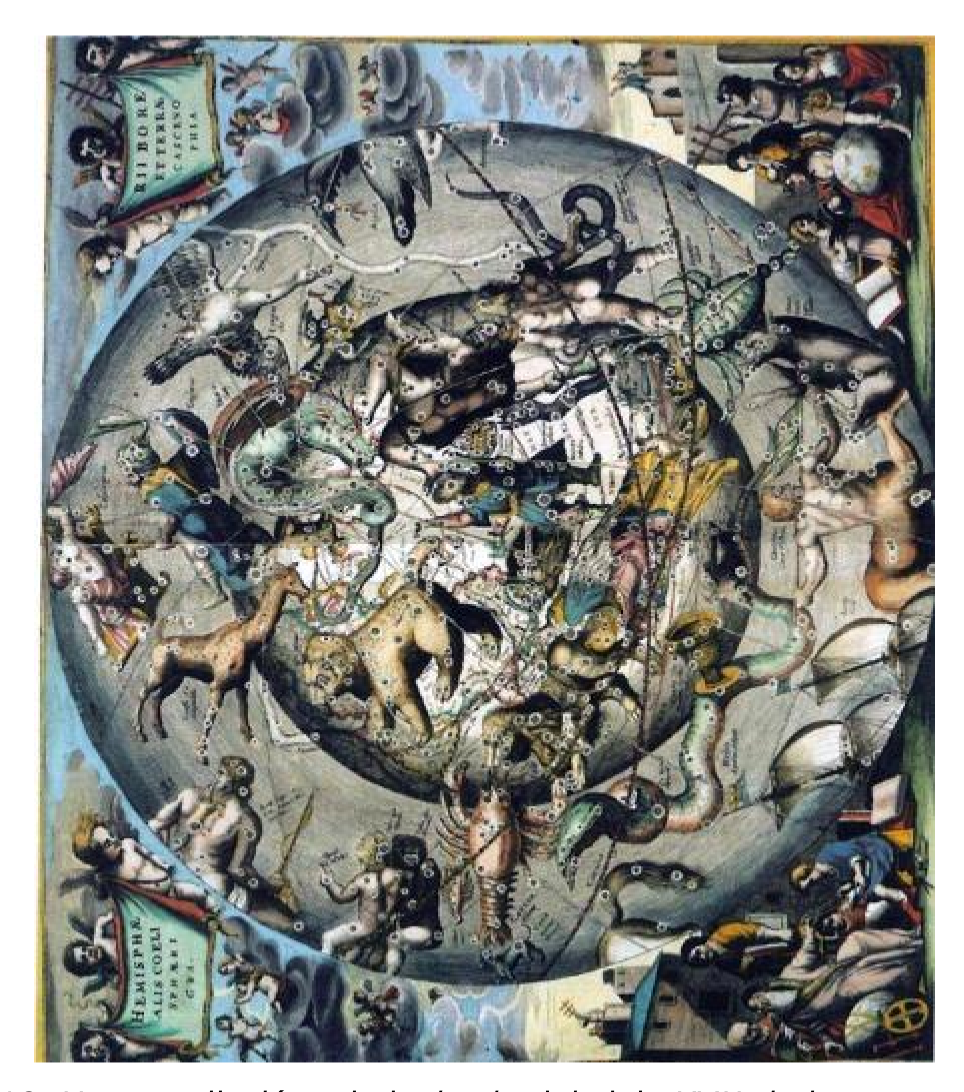


Lámina 18. Una ampliación cristianizada del siglo XVII de las constelaciones antiguas. El hemisferio norte y su cielo, del Atlas Coelestis seu Harmónica Macrocosmica, de Andreas Cellarius, Amsterdam, 1660.

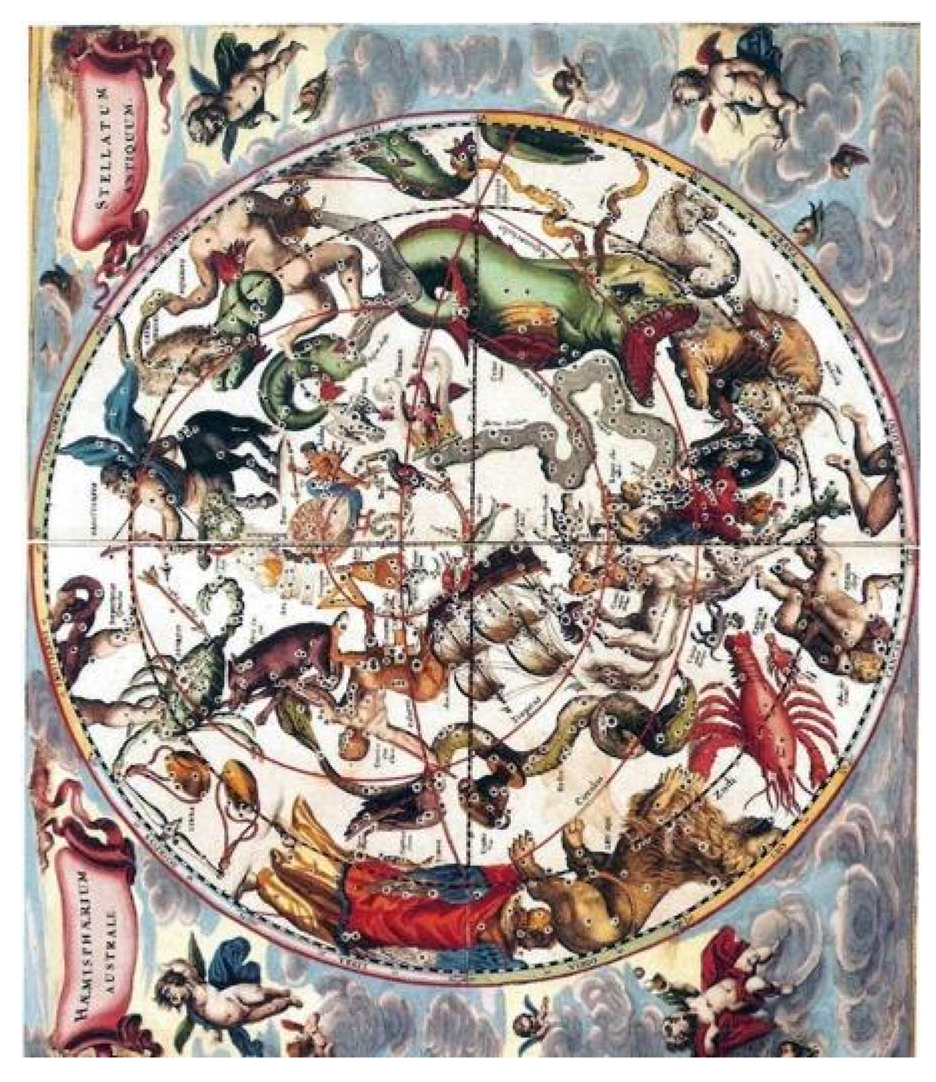


Lámina 19. El cielo austral, del Atlas Coelestis seu Harmónica Macrocosmica, de Andreas Cellarius, Amsterdam, 1660

Se encuentra que el centro de la zona vacía coincide con la posición del Polo Sur celeste en el período 2500-1800 a. C. (Figura 4.22). Queda ahora una pregunta: ¿quiénes eran?

Es fascinante que exista un cuerpo adicional de evidencia literaria que utilizaron Edward Maunder, en 1909, y más recientemente Michael Ovenden, en 1965, para estrechar más las civilizaciones candidatas[44]. La primera

[44] Un funcionario y astrónomo aficionado sueco, Carl Gotlieb Swartz (1757-1824), que estudió en la Universidad de Uppsala, abordó el problema del origen de las constelaciones de una manera sistemática más de cien años antes que Maunder. En 1807 Swartz publicó sus ideas en el libro *Recherches sur l'origin et le signification des Constellations de la Sphère greque*, traducido del sueco, que más tarde fue reeditado en una segunda edición con el

descripción completa de las constelaciones antiguas, excluyendo las posiciones exactas de las estrellas individuales, se encuentra en un poema de Arato de Soli titulado *Los Phaenomena* («Las Apariencias»), publicado hacia el 270 a. C.

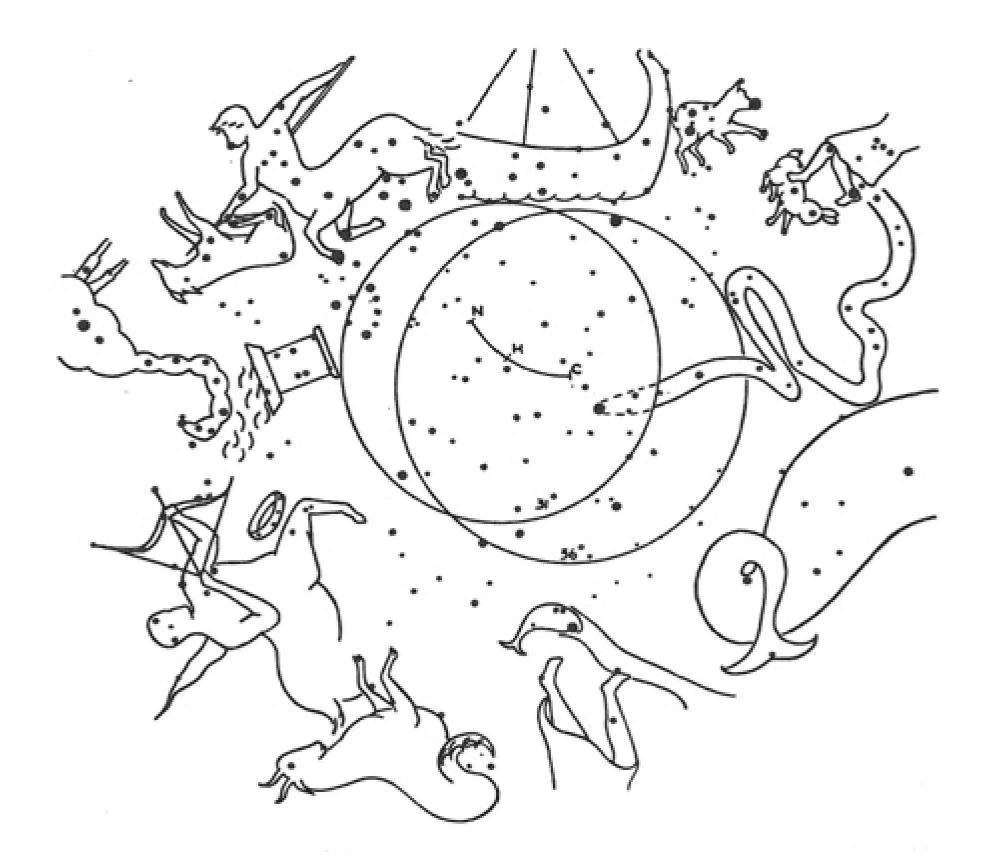


Figura 4.22. La zona del cielo austral que está vacía de constelaciones antiguas. N marca la localización actual del Polo Sur celeste; H marca su posición en la época en que Hiparco observaba el cielo (190-120 a. C.); C marca el centro de la zona circular del cielo (marcada 36Q) que está vacía de constelaciones cuando se ve desde una latitud de 36 grados norte. La zona circular (marcada 31Q) demarca la región del cielo que Hiparco no pudo

título más corto *Le Zodiaque expliqué* en 1809. Swartz advirtió la región del cielo nocturno austral que estaba despoblada de constelaciones y estimó que su diámetro angular abarcaba unos 40 grados. Utilizó esto para datar la época del origen de las constelaciones en torno a 1400 a. C. e identificó la ciudad costera de Bakú, en Armenia en el mar Caspio, a 40 grados de latitud norte, como el hogar más probable de la sociedad de marinos y navegantes que establecieron el plano de las antiguas constelaciones (ver el corte a aproximadamente 50 grados de longitud en la Figura 4.23). Los mapas de Swartz de las constelaciones antiguas, con la zona vacía de 40 grados marcada en el cielo austral, se muestran en la Figura 4.23.

haber visto, suponiendo que él observara desde Alejandría (latitud 31 grados norte). Los segmentos recortados por la intersección de los dos círculos dan las regiones del cielo que veían los creadores de constelaciones, pero que Hiparco no podía haber visto, y viceversa.

Su lista de constelaciones corresponde, en casi todo, a las 48 enumeradas por el gran astrónomo Ptolomeo, junto con sus posiciones, en su catálogo de 137 d. C. Es fascinante saber que san Pablo, que como Arato era natural de Cilicia, estaba familiarizado con esta información, porque cita los versos de apertura del poema de Arato en su alocución al Tribunal Ateniense del Aerópago en la Colina de Marte, que está recogida[45] en el Nuevo Testamento (Hechos 17). Arato se educó en Atenas, y su obra habría sido bien conocida para un público instruido. La cita aumentó la credibilidad de Pablo al mostrar su conocimiento de la literatura griega, y su contenido concreto ofrecía un punto favorable en el que empezar su sermón sobre la identidad de su «dios desconocido».

Las constelaciones de las que escribe Arato no eran creación suya. Su poema fue escrito como un tributo a Eudoxo. Versificaba la famosa exposición de las estrellas de Eudoxo, también titulada los *Phaenomena,* que había sido escrita más de un centenar de años antes. Y, de hecho, a juzgar por otras referencias de pasada a constelaciones concretas en su literatura[46], los

---

[45] El poema de Arato empieza

A Dios que está arriba dedicamos esta canción;
nunca osamos dejar de adorarle,
pues Él está presente en cada multitud atareada,
Está en toda reunión solemne.
El mar es Suyo, y Suyo cada puerto abarrotado;
en todo lugar sentimos nuestra necesidad de Él;
pues nosotros somos Sus hijos.

El discurso de san Pablo contiene las palabras:

El Dios que hizo el mundo y todo lo que hay en él, que es Señor del cielo y de la tierra, no habita en santuarios fabricados por la mano de hombres, ni es servido por manos humanas, como si de algo estuviera necesitado, él que a todos da la vida, el aliento y todas las cosas. Él creó, de un solo principio, todo el linaje humano, para que habitase sobre toda la faz de la tierra, fijando los tiempos determinados y los límites del lugar donde habían de habitar, con el fin de que buscasen al Señor, para ver si a tientas le buscaban y le hallaban: por más que no se encuentra lejos de cada uno de nosotros; pues en él vivimos, nos movemos y existimos como han dicho algunos de vuestros poetas. Porque también somos sus hijos.

[46] En el quinto libro de la *Odisea* de Homero leemos que

griegos estaban familiarizados con las constelaciones al menos un millar de años antes de Cristo.

Eudoxo de Cnido vivió entre el 409 y el 356 a. C., y fue uno de los más grandes matemáticos del mundo antiguo. Es más conocido como autor del quinto libro de la obra geométrica de Euclides, los *Elementos.* Fue atraído al estudio de la astronomía por el desafío que planteó Platón a los matemáticos para explicar los ordenados movimientos celestes. Además de sus dos importantes tratados astronómicos sobre la apariencia de los cielos, también es famoso por dejar a sus sucesores un globo grabado, «la esfera de Eudoxo». Lo utilizó para estudios astronómicos y probablemente contenía la eclíptica, el Ecuador, las estrellas conocidas y los nombres de algunas constelaciones. Debe haber sido el prototipo del moderno globo celeste que utilizan los astrónomos para representar en forma tridimensional la información contenida en la Figura 4.19. Por desgracia, ni sus escritos ni su esfera sobreviven. No obstante, sabemos mucho sobre ellos gracias al poema de Arato, que fue encargado en el 270 a. C., por el rey Antígono Gonadas de Macedonia como un tributo póstumo a Eudoxo.

Con el corazón palpitante Ulises desplegó sus velas:
situado en el timón se sentó y señaló los cielos,
sus ojos siempre alerta no cedían al sueño.
A la vista estaban las Pléyades y el Equipo del Norte,
y el haz más refulgente del gran Orion,
al cual, girando en torno al eje del cielo,
la Osa apunta su ojo dorado.



Figura 4.23. Mapas de las constelaciones de Carl Swartz, de 1809, que muestran la zona vacía en el cielo austral, de lo que dedujo que quienes crearon las constelaciones vivían a 40 grados de latitud en Bakú.

Al autor se le encargó hacer un tributo en verso que incorporase el contenido astronómico del estudio de los cielos de Eudoxo. Puesto que el autor no era astrónomo, sigue de cerca el original de Eudoxo y ofrece una guía del cielo muy detallada, constelación por constelación.

Ciento cincuenta años más tarde, Hiparco de Rodas, el más grande de los astrónomos griegos (descubrió la precesión del Eje Polar de la Tierra) estudió el poema de Arato. Quedó intrigado por lo que encontró. Ni Arato ni Eudoxo podían haber visto la disposición de constelaciones allí registrada. Describían disposiciones de estrellas que nunca aparecían sobre el horizonte en la época en que escribieron. Además, había otras estrellas, ahora obvias para Hiparco, de las que Arato no hacía ninguna mención. Hay una explicación para estas discrepancias. Las constelaciones fueron identificadas inicialmente por astrónomos muy anteriores a Eudoxo. Y, como resultado de la precesión del eje de rotación de la Tierra, el cielo que veían era significativamente diferente del cielo visto por Eudoxo, Arato e Hiparco. Incluso es posible que Hiparco hubiera empezado a desvelar el fenómeno de la precesión polar de la Tierra al tratar de reconciliar los datos de Eudoxo, en el poema de Arato, con lo que él conocía del cielo en su propia época, aunque no hay prueba directa de esto.

Es evidente que mediante un análisis cuidadoso de las constelaciones incluidas y omitidas se podría determinar a partir del poema de Arato la época para la que ofrece una descripción correcta del cielo. En 1965, el astrónomo escocés Michael Ovenden realizó este análisis de las descripciones astronómicas en la obra de Arato para deducir la latitud y la fecha de los creadores originales de la información que daba el poema de Arato sobre las constelaciones. (Un colega comprobó el análisis). Ovenden encontró una latitud entre 34,5 y 37,5 grados norte, y una época entre 3400 y 1800 a. C. Esto concuerda extraordinariamente bien con las anteriores deducciones extraídas de la ausencia de antiguas constelaciones australes (2500-1800 a. C.), y ofrece una confirmación de la idea de que los creadores de constelaciones originales vivían en una época y en una región. Precedieron a Eudoxo en miles de años. Eudoxo debe haber repetido meramente la información que heredó de ellos sin ponerla a prueba frente a las observaciones. Si lo hubiera hecho, habría descubierto que describía pautas

de estrellas que no eran visibles para él y omitía otras que lo eran. Arato hizo lo mismo, pero difícilmente se le podría culpar, después de todo, él no pretendía ser un astrónomo.

En 1984, un colega de Ovenden en Glasgow, Archie Roy, llevó a cabo un estudio más detallado de la época astronómica a la que se refiere el poema de Arato utilizando las frases concretas del poema para deducir cómo los Trópicos de Cáncer y de Capricornio, y el Ecuador, intersecan a las constelaciones. Para apreciar el detalle que se puede conseguir con este tipo de análisis, consideremos la información que da el poema sobre el Ecuador (que se identifica en las tres primeras líneas); Arato da una especificación detallada de las constelaciones asociadas:

En medio de ambas, enorme como la Vía Láctea,
un círculo divide la Tierra en dos,
y en él dos veces son iguales días y noches,
cuando termina el verano y cuando empieza la primavera.
Como marca allí yace el Carnero y las rodillas del Toro,
el Carnero se extiende a lo largo del círculo,
pero sólo aparecen las patas encogidas del Toro.
Y, en ella, el brillante cinturón de Orión,
la curva brillante de la Serpiente de agua; el Cuenco
aunque pequeño, el Cuervo y algunas pocas estrellas de las Garras.
Las rodillas del Serpentario están en el límite.
No comparte el Águila, mensajera
del poder que vuela en la noche, al trono de Zeus.
En ella se revuelven la cabeza y el cuello del Caballo.

Roy tomó este pasaje, junto con otros dos que tratan de las intersecciones de los Trópicos de Cáncer y de Capricornio, y utilizó la información para programar un planetario que recreara las apariencias de los cielos nocturnos

entre el presente y el año 5000 a. C. Hay una sorprendente convergencia de todas las frases con la apariencia del cielo en las latitudes mediterráneas de interés, tal como se habrían observado entre aproximadamente el 2200 a. C. y el 1800 a. C.

Hemos seguido tres líneas de investigación diferentes que apuntan a la misma localización y marco temporal para los creadores de constelaciones. Evidentemente, Eudoxo no podría haber ideado la famosa esfera que lleva su nombre y de la cual derivaban en última instancia las posiciones de las estrellas en el poema de Arato. La astronomía encarnada en su esfera, y quizá la propia esfera, deben haber sido heredadas de otra civilización cuyos astrónomos estaban activos más de mil quinientos años antes de que naciera Eudoxo. Esa esfera fue grabada probablemente para permitir que un navegante utilizara las constelaciones para fijar una ruta recordando el orden en que aparecían y se ponían en el horizonte. Esto habría sido particularmente útil porque, a diferencia de los marinos de hoy, a ellos les hubiera faltado una estrella polar conveniente para guiarlos.

Una interpretación de este notable conjunto de pruebas es que los antiguos creadores de constelaciones realizaron las figuras astrológicas y mitológicas en el cielo como una encarnación de sus propios espíritus, héroes y demonios familiares, y organizaron su paisaje de una forma general y fácil de recordar para sus propios fines de navegación. El poema de Arato está lleno de alusiones a los peligros en el mar, lo que implica que los creadores de su astronomía eran una raza de marinos que necesitaban una comprensión del cielo para fines de navegación. Pueden haber sido los inventores de las constelaciones, o pueden haber adaptado un esquema mitológico más primitivo de nombres de estrellas a un sistema de uso práctico para navegantes. Una tradición afirma que Eudoxo obtuvo su esfera, o la información necesaria para construirla, durante sus viajes por Egipto, pero no se ha encontrado nada similar en la enorme colección de restos de la antigua civilización egipcia. Incluso así, si Eudoxo la recibió durante su vida,

¿por qué los egipcios le dieron una información sobre el cielo que estaba miles de años desfasada? Ellos mismos no podrían haber visto estas figuras en el cielo. ¿Eran ellos conscientes de que le estaban dando un modelo inferior y muy desfasado? Si es así, ¿dónde está la prueba de otros modelos mejores que estuvieran utilizando? Es más probable que también ellos hubieran heredado algo que no entendían por completo. Incluso si supieran que no describía el cielo que podían ver, fueron incapaces de corregirlo mediante otras observaciones. De modo que ¿por qué no obtuvieron una nueva versión de sus suministradores originales? Para ofrecer algunas respuestas posibles a estas preguntas tenemos que estrechar la lista de candidatos para los primeros creadores y usuarios de constelaciones.

Dejemos la astronomía, y volvamos a la geometría y la historia. La línea de latitud de 36 grados, que identificamos como el hogar de los creadores de constelaciones, corre a través del Mediterráneo y el Próximo Oriente (véase la Figura 4.24). Había varias antiguas civilizaciones avanzadas próximas que podrían haber establecido las constelaciones antiguas como ayudas para la navegación. Los fenicios, que vivían en la región ahora denominada Líbano, pueden descartarse pues, a pesar de su historia como comerciantes y marinos, su civilización tuvo su período dorado más de mil años después de la época del 2500 a. C. en la que estamos interesados. Por el contrario, aunque los antiguos egipcios fueron sobresalientes en sus logros matemáticos y técnicos en esa época, su latitud está por debajo de los 32 grados norte; esto parece demasiado al sur para que ellos hayan sido los creadores de constelaciones. Los babilonios son ciertamente mejores candidatos. Ellos han dejado miles de tablillas cuneiformes que detallan sofisticados estudios matemáticos y astronómicos que se remontan al 3000 a. C. Además, sus intereses astrológicos eran fuertes. Tenían un interés especial en registrar las posiciones y figuras de las estrellas, porque creían que los asuntos humanos estaban controlados por ellas; ya hemos visto que su preocupación por la jerarquía de los planetas dio forma a la estructura de

su semana astrológica de siete días. Sus registros escritos dan copiosa información sobre las estrellas y asocian algunas de ellas con las mismas imágenes que utilizamos hoy. Las frases del poema de Arato parecen ser completamente compatibles con el cielo tal como se ve desde la latitud de Babilonia en torno al 2500 a. C. Parece haber poca duda de que los temas representados por las antiguas constelaciones estaban profundamente inmersos en la cultura sumeria de Mesopotamia en esa fecha. Otro indicador está contenido en los nombres de las propias constelaciones. Se han descubierto en la vecindad del río Éufrates tablillas astronómicas que datan de aproximadamente el 600 a. C. Dan nombres griegos para las constelaciones, pero las imágenes que representan las figuras de estrellas son mucho más antiguas. Por ejemplo, la constelación que seguimos llamando Tauro, «El Toro», es mencionada en estas tablillas como el «Toro al frente». En esa época, el año se medía a partir del comienzo de la primavera, que estaba definido por el equinoccio vernal (el día en que hay horas iguales de luz diurna y oscuridad). Esto, como el equinoccio de otoño, ocurre cuando la eclíptica interseca la proyección del Ecuador terrestre sobre el cielo.

Actualmente, el Sol está en la constelación de Piscis en el equinoccio vernal, pero en la época de Hiparco estaba en Aries, y Ptolomeo hace de Aries la primera constelación del Zodiaco. La descripción «Toro al frente» indica que el nombre del Toro se le dio a la constelación cuando estaba al frente del año —en el momento del equinoccio vernal—. Si calculamos cuándo estaba el Sol en la constelación de Tauro durante el equinoccio vernal obtenemos 2450 a. C.: casi dos mil años antes de que se grabaran las tablillas y en notable acuerdo con nuestros otros indicadores sobre el origen de las constelaciones. Además, en esta temprana época hay una lógica para el resto del cielo: en el solsticio de verano, el Sol estaba cerca de Regulus, la estrella más brillante en Leo; en el equinoccio de otoño, estaba cerca de Antares, la estrella más

brillante en Escorpio, y en el solsticio de invierno estaba próximo a Formalhaut, la estrella más brillante cerca de Acuario, la corriente de agua.

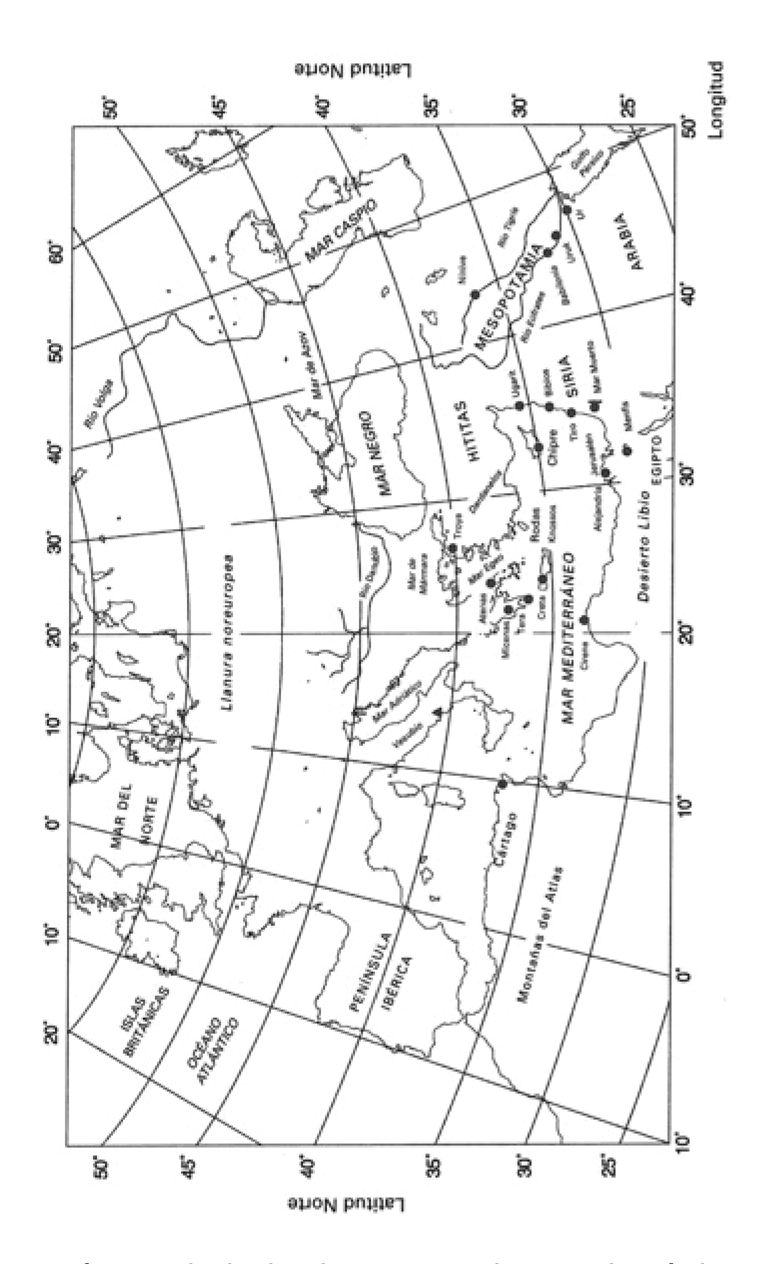


Figura 4.24. Líneas de latitud que atraviesan el Próximo Oriente.

Éste no es el fin de la historia. Aunque quizá los babilonios hayan sido los que dieron la forma original a las constelaciones, sus actividades marinas parecen demasiado pequeñas, y están en las latitudes equivocadas para hacer gran uso de los elaborados sistemas de constelaciones descritos por

Eudoxo y Arato. Esta disonancia llevó a Roy a buscar otra antigua civilización marina que podría haber adoptado y mejorado el sistema astrológico de los sumerios para usar en la navegación por el Mediterráneo. Hay sólo una civilización candidata en la latitud correcta (aproximadamente 36 grados); se encuentra a menos de 1800 kilómetros al oeste de Babilonia, en la isla de Creta —el hogar de los minoicos.

Hasta principios del siglo XX, el reino de Minos significaba poco más que la tierra perdida de la Atlántida; el hogar de figuras míticas como Dédalo e Ícaro, o del gran Minotauro, mitad toro y mitad humano, que moraba en el Laberinto. Luego, poco a poco, los arqueólogos empezaron a probar las sospechas previas de una gran cultura innovadora, centrada en Creta. Pueden encontrarse referencias a actividades comerciales entre Creta y otras culturas mesopotámicas tan tempranas como el 2350 a. C.; su comercio con Egipto era extensivo, y se han encontrado tesoros de origen egipcio entre las ruinas del palacio minoico en Knossos. La gama de materiales de construcción no indígenas que utilizaban da una idea de navegación extensiva en toda la región mediterránea. Pero cuando estaba en su apogeo, esta sofisticada cultura tuvo un final súbito y catastrófico. Aproximadamente en el 1450 a. C. un gran desastre natural llevó a su civilización a una caída en picado. Habían capeado un primer terremoto hacia el 1700 a. C. pero el desastre que siguió parece haber sido de otra magnitud. En esa época tuvo lugar una enorme erupción volcánica en la isla de Thera en el Egeo, y se produjo una explosión que dejó un cráter de cientos de metros de profundidad que abarcaba casi un centenar de kilómetros cuadrados. Las cenizas, residuos, temblores y enormes olas que produjo acabaron con los minoicos. Sus viejos puertos muestran evidencia de una espectacular compactación y movimiento de piedra. Lo que no fue destruido cayó presa de otros invasores; de repente, la más avanzada civilización europea de su tiempo había desaparecido.

No se ha encontrado ningún documento o aparato astronómico entre las ruinas de Minos que pruebe que los minoicos fueran los grandes navegantes y usuarios de constelaciones alrededor de quienes giraba el cielo en el tercer milenio antes de Cristo. Pero ellos encajan perfectamente. Sus horizontes comerciales se estaban agrandando en el 2500 a. C.; vivían en el paralelo 36; sus habilidades de navegación y construcción dan la impresión de ser capaces de adaptar y superar cosas que aprendían de otras culturas. Tenían fuertes vínculos comerciales con Babilonia y habrían estado expuestos a su patrón astrológico de constelaciones. Roy conjetura que la fuente del globo celeste que Eudoxo encontró en Egipto, con su misteriosa imagen fosilizada de los cielos como sólo podrían haberse visto dos mil años antes, era Minos. Si así fuera, se aclara la razón por la que nunca fue reemplazado por una versión actualizada. En el período entre el 2500 a. C. y la visita de Eudoxo, más de dos mil años después, la civilización minoica había sido completamente destruida. Y de su hallazgo de estrellas no queda nada salvo la historia de Eudoxo.

Incluso si esta historia ofrece la explicación para el diseño global y la cubierta celeste de las antiguas constelaciones, hay aún muchas posibilidades para el desarrollo de las diferentes constelaciones, ya aparecieran al mismo tiempo o sobre un período dilatado. Alex Gurstein, un historiador ruso de la astronomía antigua, ha tratado de explicar la aparición de constelaciones concretas en épocas muy anteriores considerando su lugar como marcadores de características astronómicas clave del cielo. Estos marcadores cambian durante miles de años debido a la precesión del eje de rotación de la Tierra, y así se definen nuevas constelaciones como marcadores en diferentes milenios. No se sugiere que estos antiguos observadores del cielo tuvieran que comprender el fenómeno de la precesión. Probablemente atribuían la carencia de grupos de estrellas bautizadas en puntos especiales del cielo a descuidos de generaciones anteriores, o quizá

incluso a grandes cambios en los cielos debidos a la voluntad de los dioses celestes.

Gurstein propone que observaciones astronómicas del movimiento del Sol a lo largo de la eclíptica —la denominada *via Solis*— habrían establecido una correlación entre la apariencia del cielo nocturno y las estaciones del año. Esto habría conducido de forma natural a la identificación de cuatro grupos de estrellas especiales, uno por cada estación. Los cambios estacionales están marcados por el equinoccio vernal, el punto del solsticio de verano (cuando el Sol alcanza su máxima altura en el cielo a mediodía), el equinoccio de otoño y el punto del solsticio de invierno (cuando el Sol está más bajo en el cielo a mediodía). Se habrían apreciado cuando se hiciera evidente que el movimiento anual del Sol en el cielo permite predecir con fiabilidad los cambios estacionales. Gurstein cree que la identificación de las primeras constelaciones se hizo básicamente para marcar áreas importantes de la esfera celeste, más que para unir simplemente grupos de estrellas brillantes, por razones simbólicas o para navegación. La precesión de 26 000 años de la Tierra hará que la posición de los marcadores de las cuatro estaciones cambie durante miles de años y requerirá que se introduzcan nuevas constelaciones marcadoras. Mientras tanto, el plano de la eclíptica permanece prácticamente invariante en el cielo. Por consiguiente, las constelaciones marcadoras se mueven en sentido contrario a las agujas del reloj a través de los signos del zodiaco (que literalmente significa «círculo de animales»), atravesando un signo cada 26 000/12 = 2140 años. Por lo tanto, las mismas estrellas marcadoras definirán los equinoccios y solsticios razonablemente invariantes durante aproximadamente dos mil años.

Época	*Primavera*	*Verano*	*Otoño*	*Invierno*
8-7000 a.C.	Cáncer	Libra	Capricornio	Aries
6-5000 a.C.	Géminis	Virgo	Sagitario	Piscis
4-3000 a.C.	Tauro	Leo	Escorpión	Acuario
2-1000 a.C.	Aries	Cáncer	Libra	Capricornio
1-2000 d.C.	Piscis	Geminis	Virgo	Sagitario
3-4000 d.C.	Acuario	Tauro	Leo	Escorpión

Gurstein investigó los símbolos religiosos y mitológicos concretos que eran dominantes en las sociedades conocidas en diferentes épocas y que habrían llevado a la elección de criaturas para expresar las estrellas marcadoras. Probablemente una clave para la cronología procede también de los tamaños de las constelaciones en el cielo. Las más grandes tenderían a ser las primeras en escogerse como marcadoras. Él concluye que las cuatro primeras constelaciones en el camino del Sol se escogieron durante el sexto milenio antes de Cristo, posiblemente dentro de la región de la Tierra que difundió la cultura y las lenguas indoeuropeas.

Estudio en escarlata. Las fuentes de la visión del color

Tengo miedo de la oscuridad y sospecho de la luz.
WOODY ALLEN

En el capítulo segundo examinamos algunas de las restricciones que impone la habitabilidad de un cuerpo celeste. Dos propiedades se revelaban importantes para la evolución y mantenimiento de la vida basada en átomos en una superficie planetaria sólida y estable: la existencia de una estrella estable en la «secuencia principal», como el Sol, y la presencia de una atmósfera gaseosa. Una tercera propiedad, una rotación del planeta en torno a su eje, es muy probable; se necesitaría una improbable combinación de circunstancias para impedirla. Esperaríamos que éstas fueran características

de los planetas en donde es probable la evolución espontánea de la vida. Pero estas propiedades se combinan para crear una propiedad del ambiente planetario resultante que puede dar lugar a una adaptación tan inesperada como trascendental.

La mezcla de longitudes de onda emitidas por una estrella estable como el Sol; la alternancia diaria de períodos de luz y oscuridad debida a la rotación planetaria, y la dispersión y absorción de la luz estelar por una atmósfera planetaria: estos procesos se combinan para dar condiciones de iluminación en la superficie del planeta que hacen ventajosa y adaptativa la evolución de un tipo particular de visión del color.

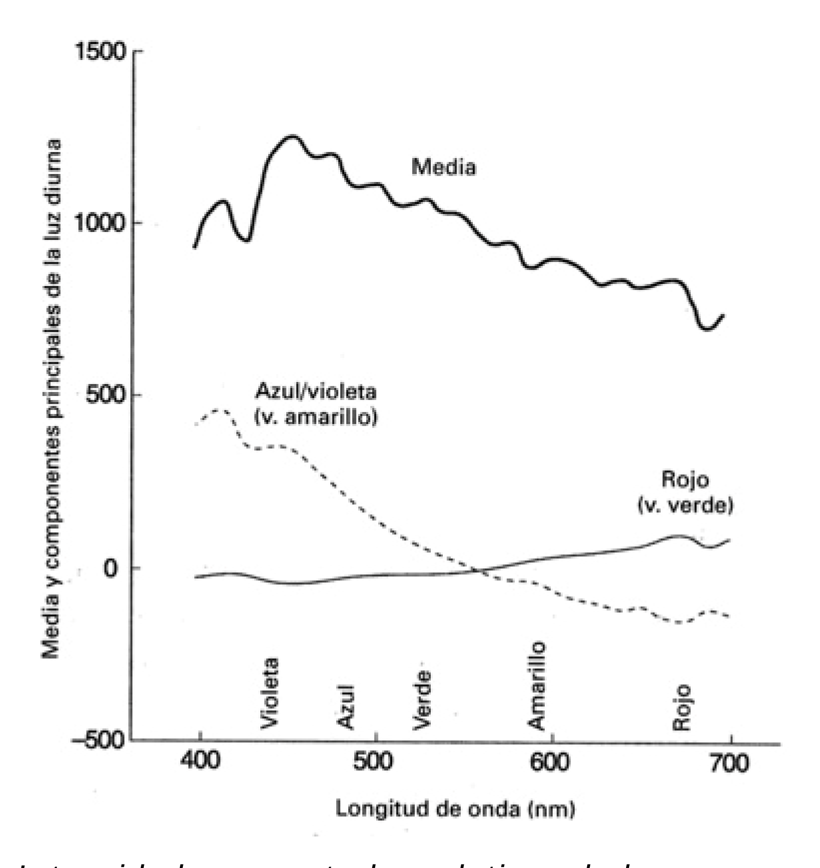


Figura 4.25. Intensidades espectrales relativas de las componentes media, azul-amarillo y rojo-verde de la luz diurna.

Si consideramos la recepción de la luz solar dispersada en la superficie de la Tierra, sabemos que buena parte de la energía radiante del Sol es absorbida

por el vapor de agua y el ozono en la atmósfera. La intensidad de emisión del Sol tiene su máximo en la región azul-verde del espectro de colores (Figura 4.25), pero la dispersión de la luz por las moléculas en la atmósfera de la Tierra afecta más a las longitudes de onda más cortas (índigo, azul y verde); de modo que no llegan a nuestros ojos y por ello el disco del Sol aparece amarillo. La luz azul dispersada es la que hace azul el resto del cielo. El agua pura parece azul por la misma razón. Si apartamos la vista del Sol estamos viendo luz que ha sido dispersada en la atmósfera. Los fotones de longitud de onda más corta (más azules) son más dispersados, y por ello el cielo es azul; si miramos hacia la puesta de sol (véase la Lámina 10) recibimos los fotones de longitud de onda más larga (más rojos) que son menos dispersados *en route* hacia nuestros ojos. (Resulta irónico que las puestas de sol más espectaculares, con fuertes rojos, naranjas y púrpuras, ocurren sobre las ciudades con más polución industrial o en la vecindad de erupciones volcánicas, porque el aire contiene una sobreabundancia de gases procedentes del escape de los automóviles o partículas de humo que amplifican el proceso de dispersión). Cuando las partículas dispersoras en la atmósfera se hacen más grandes —gotitas de vapor de agua, copos de nieve o partículas de arena o de polvo— la dispersión deja de depender significativamente de la longitud de onda (color) de la luz solar[47]. Todas las longitudes de onda son entonces dispersadas más o menos por igual, y el resultado es una escena blanca o neblinosa. Por eso es por lo que las nubes y los cielos cubiertos o con niebla parecen blancos, y por lo que el océano parece blanco cuando se ve a través de la bruma desde una playa arenosa en condiciones duras y ventosas. También hay animales blancos, como los osos polares, que deben su apariencia a este efecto más que a la presencia de un pigmento intrínseco de color blanco. Los huecos de la piel en un oso

[47] La intensidad de la luz dispersada es proporcional a la cuarta potencia de su frecuencia. Por ello, en el intervalo de frecuencias a las que es sensible el ojo, la intensidad de la luz azul será 16 veces mayor que la de la luz roja (cuya frecuencia es la mitad que la de aquélla).

polar contienen minúsculas burbujas de aire que dispersan la luz incidente y dan al conjunto de pelos transparentes una apariencia blanca.

La luz de Luna, que es tan sólo luz solar reflejada en la cara de la Luna, tiene un espectro muy similar al de la luz solar directa, aunque su intensidad es un millón de veces menor. Toda la luz estelar procedente del resto del Universo es todavía mil veces más débil. Entre la luz de Luna y la luz solar tenemos el crepúsculo. Su espectro de colores difiere del de la luz solar y la luz lunar; los tres espectros se muestran en la Figura 4.26.

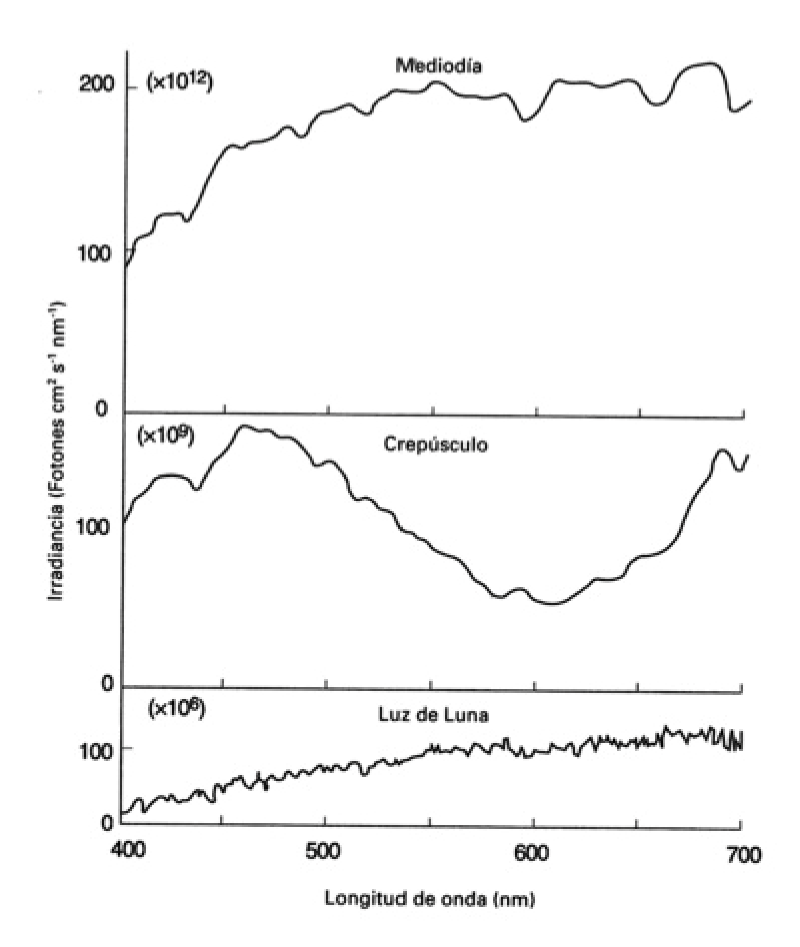


Figura 4.26. Composición espectral de la luz lunar, la luz solar y el crepúsculo. Datos tomados en el verano de 1970 en Einewetok Atoll.

En el crepúsculo, los rayos de luz solar deben atravesar un trecho mayor de atmósfera antes de llegarnos, y la absorción de la luz amarilla y naranja por

las moléculas de ozono se hace importante. Esto da al color del cielo un ligero tono magenta en los últimos 30 minutos antes de la puesta de sol y en los 15 minutos anteriores a la salida.

Hemos mencionado el fenómeno del crepúsculo transitorio porque puede ser la razón de una característica peculiar de la visión humana del color. En 1819, un fisiólogo checo, Jan Purkinje, advirtió un curioso fenómeno cuando observaba las flores de su jardín en el crepúsculo. Se dio cuenta de que el brillo relativo de las flores de diferente color cambiaba a medida que la luz se debilitaba. Las flores rojas se hacían negras, mientras que las hojas verdes seguían verdes y brillantes. A bajos niveles luminosos el ojo humano se hace más sensible a la luz azul y verde que a la luz roja (Figura 4.27).

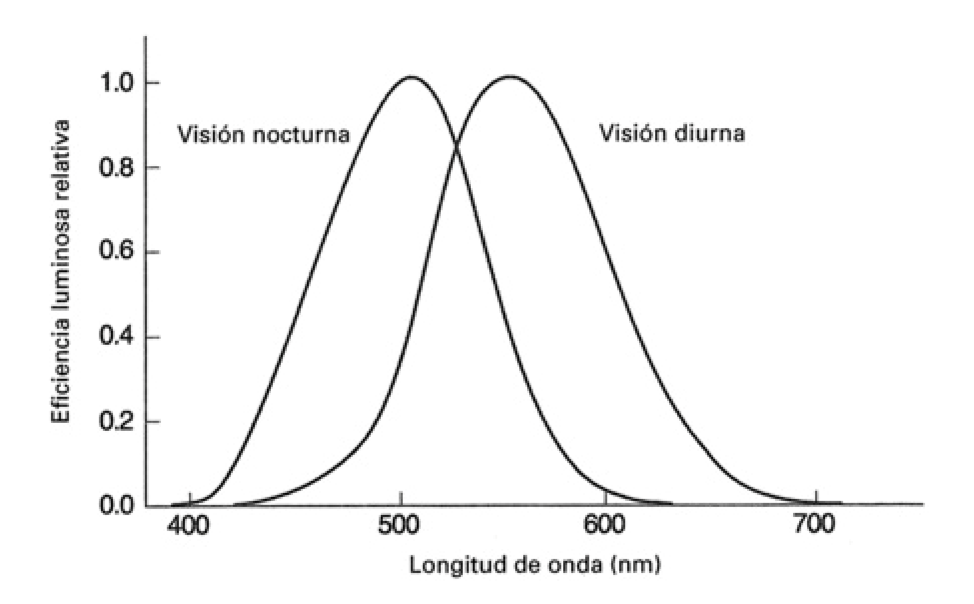


Figura 4.27. Eficiencias de la recepción humana de los colores en la visión diurna y la visión nocturna.

Al principio, este comportamiento parece ser poco adaptativo porque, como se puede ver en la Figura 4.26, la luz lunar (y también la luz estelar) contiene luz de longitud de onda más larga (roja) que la luz diurna. Por lo tanto, podríamos haber esperado que la sensibilidad humana al rojo

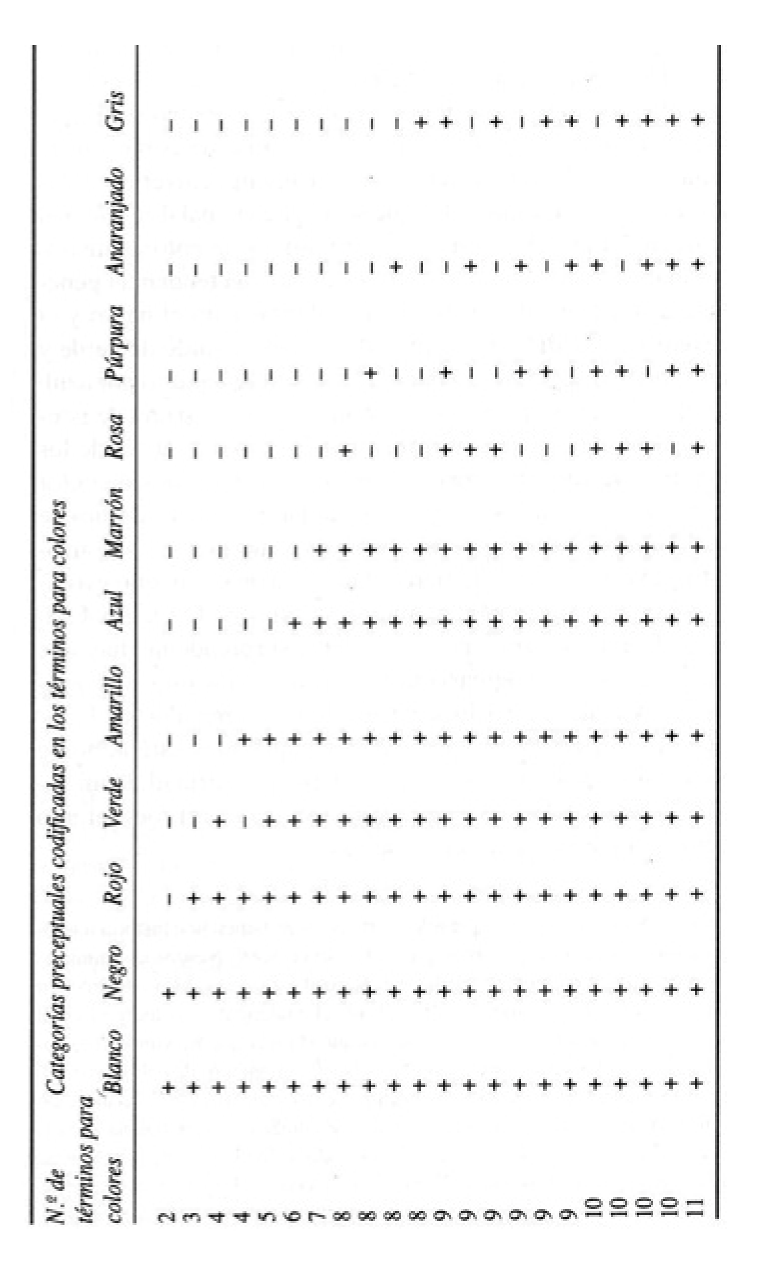
aumentara, y no que disminuyera, a bajos niveles de iluminación. Sin embargo, si comparamos las Figuras 4.26 y 4.27 vemos que, cuando descienden los niveles luminosos, la longitud de onda a la que el ojo es más sensible se desplaza hacia donde se requiere una mayor sensibilidad en condiciones de penumbra[48]. La consecuencia es que esta zona de penumbra es la más peligrosa: las condiciones de iluminación están variando rápidamente, aparecen los predadores nocturnos y comienza a notarse la fatiga. Podría ser más adaptativo tener mejor visión durante este período breve pero peligroso que optimizar la recepción al espectro de luz lunar cuando los niveles luminosos son demasiado bajos para permitir que de ello se obtenga cualquier ventaja real.

Las descripciones humanas transculturales de los colores son fascinantes. Sabemos que el color está determinado por la longitud de onda de la luz, y hay un espectro totalmente continuo entre el rojo y el violeta. De todas formas, todos identificamos un pequeño conjunto de colores definidos —rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo, violeta— y exageramos las diferencias entre ellos[49]. Se han hecho estudios detallados de las palabras utilizadas para designar los colores en diversas culturas y lenguas. Un estudio sobre 98 lenguas en el que se mostraba a hablantes nativos un conjunto de cartas de colores diferentes encontró que había una elección prácticamente universal de las regiones del espectro luminoso a las que se asignaban palabras para el color. La diferencia principal estaba en el número

[48] Sin embargo, el máximo es poco pronunciado y todavía se discute mucho sobre la razón del «desplazamiento al azul» de la sensibilidad del ojo, una característica compartida por un gran número de crustáceos y vertebrados aparentemente no relacionados. Quizá hay alguna ligadura bioquímica en las moléculas involucradas, o una adaptación a una característica ambiental pasada que ya no existe o alguna diferencia aún no descubierta entre los conos y los bastones (células sensibles a la luz) del ojo.

[49] Los siete colores del espectro que seleccionó Newton tienen una historia interesante. En sus primeras lecciones y escritos sobre el color en 1669, Newton delimitó solamente los colores primarios: rojo, amarillo, verde, azul y púrpura. Más adelante, en 1671, introdujo otros colores secundarios. Parece que el anaranjado y el índigo fueron añadidos para elevar el número total hasta siete, porque él creía que las vibraciones luminosas eran análogas a las vibraciones sonoras y por ello el número de colores primarios debería corresponder a los siete tonos musicales de la escala diatónica. La elección del índigo como un tono espectral distinto debe algo sin duda a su importancia comercial en los días de Newton. El colorante de la India (índigo) fue introducido en Europa durante el siglo XVI y fue ampliamente utilizado desde entonces. Hoy, la mayoría de los científicos encuentran el término «índigo» sólo en una lista de los colores del espectro

de colores distinguidos por palabras de color. Aquí también había una tendencia general. Las lenguas más sencillas sólo tenían palabras para el negro y el blanco; el siguiente añadido más habitual era rojo, seguido de verde y amarillo con aproximadamente la misma frecuencia, seguido por azul, luego marrón, y luego púrpura, rosa, naranja y gris. La pauta de ocurrencia de palabras de color se muestra en la Tabla 4.4; sólo 22 de los 2048 conjuntos lógicamente posibles de los once términos de color básicos se encontraron en los lenguajes estudiados. Estos estudios se han interpretado en el sentido de que indican cómo tiende a desarrollarse nuestro léxico de color. Sugieren una pauta de desarrollo evolutivo de las palabras para el color, como se muestra en la Figura 4.28.



N.º de términos para colores	Categorías preceptuales codificadas en los términos para colores										
	Blanco	Negro	Rojo	Verde	Amarillo	Azul	Marrón	Rosa	Púrpura	Anaranjado	Gris
2	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–	–
3	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–	–
4	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–	–
4	+	+	+	–	+	–	–	–	–	–	–
5	+	+	+	+	+	–	–	–	–	–	–
6	+	+	+	+	+	+	–	–	–	–	–
7	+	+	+	+	+	+	+	–	–	–	–
8	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–	–
8	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	–
8	+	+	+	+	+	+	+	–	–	+	–
8	+	+	+	+	+	+	+	–	–	–	+
9	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
9	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–
9	+	+	+	+	+	+	+	+	–	–	+
9	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+	–
9	+	+	+	+	+	+	+	–	+	–	+
9	+	+	+	+	+	+	+	–	–	+	+
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–
10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+
10	+	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+
10	+	+	+	+	+	+	+	–	+	+	+
11	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

TABLA 4.4. Los 22 vocablos de color identificados originalmente por Beriin y Klay en su estudio de los pueblos tradicionales. El más simple (tipo I) tiene solo dos palabras que designan colores para negro y blanco; el más sofisticado (tipo 22) tiene once palabras para distintos colores.

Aunque la tendencia es clara y no enteramente sorprendente, hay que tener cuidado en no llevar demasiado lejos estos datos más bien unidimensionales. Mantener una lista de palabras divorciadas de la situación y circunstancias en las que viven sus hablantes está lleno de sesgos potenciales. Quien viva en

la nieve tendrá necesidad de un espectro diferente de palabras para el color que si viviera todo el año bajo un cielo azul o errara por verdes selvas.

[Blanco, Negro] → [Rojo] → [Verde] → [Amarillo] → [Azul] → [Marrón] → [Púrpura, Rosa, Naranja, Gris]
[Rojo] → [Amarillo] → [Verde] → [Azul]

Figura 4.28. Desarrollo evolutivo de la descripción del color sugerido por los datos de la Tabla 4.4.

Blanco y negro son los primeros términos necesarios para transmitir información sobre los niveles de luz y oscuridad en el ambiente. Los vocabularios que les siguen en complicación añaden términos para «rojo», que incluyen matices de marrón y suelen estar ligados a la descripción del suelo o de la sangre. Incluso hoy reconocemos la preponderancia de negro, rojo y blanco como símbolos de cargo, y con frecuencia se utilizan en uniformes o vestimentas ceremoniales; recordemos el *Rojo y Negro* de Stendahl.

Nuestras categorías de color no parecen accidentales. Están ligadas al hecho de que el sistema visual es tridimensional. En condiciones de brillo, los ojos tienen tres tipos de detectores (conos) en la retina, con pigmentos fotoquímicos cuyos máximos de sensibilidad están ajustados respectivamente a las regiones de longitud de onda larga, media y corta del espectro visible. El ojo registra tres elementos de información independientes, que luego son sopesados y combinados para darnos la sensación de color final. Estas tres sensibilidades visuales pueden reexpresarse como el nivel de brillo, la variación amarillo-azul y la variación rojo-verde. A veces se representan en un círculo de color (véase la Figura 4.29), introducido por primera vez por Isaac Newton en 1704. Este círculo une los dos extremos del espectro para ilustrar la tendencia humana a

encontrar el color rojo de larga longitud de onda y el violeta de corta longitud de onda más parecidos que otros colores del espectro que están mucho más próximos uno a otro en longitud de onda.

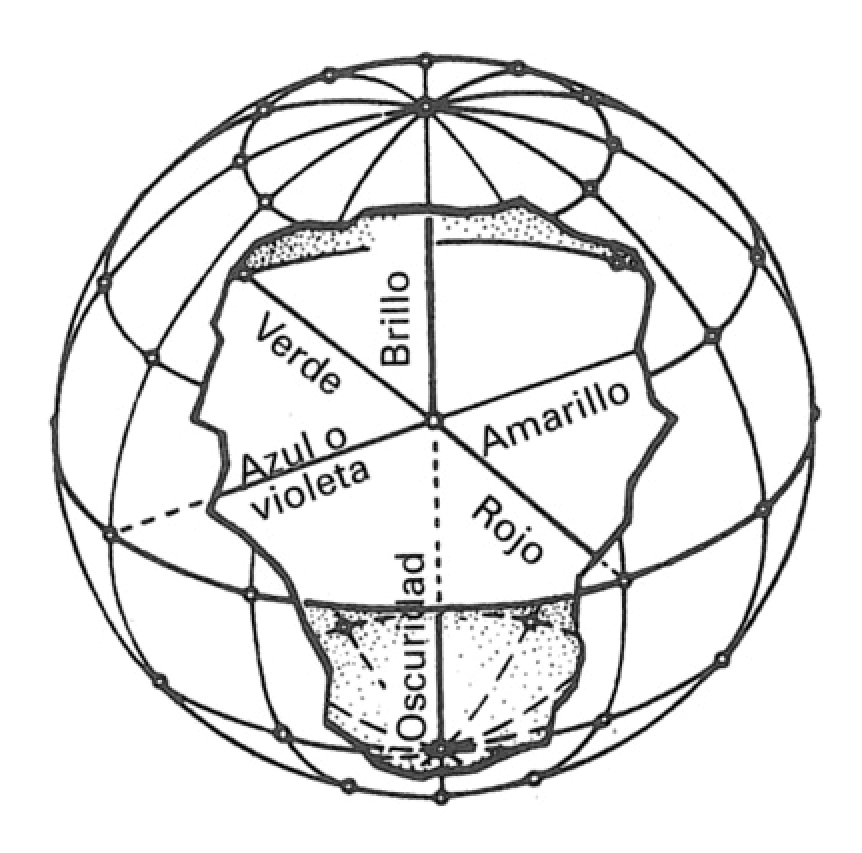


Figura 4.29. Círculo de colores de Newton. Una parametrización tridimensional esquemática de nuestra representación normal del color en términos de los ejes de brillo versus oscuridad, azul versus amarillo, y rojo versus verde.

Es ahora un desafío identificar aspectos del entorno tales que una adaptación a los mismos tendería a seleccionar discriminación oscuro-luminoso, azul-amarillo y rojo-verde junto con la asociación psicofisiológica de los dos extremos del espectro de colores. El intervalo total de sensibilidad espectral del ojo humano (400-700 nanómetros[50]) refleja el intervalo de longitudes de

[50] Un nanómetro es una milmillonésima de metro.

onda de la radiación solar que nos llega después de atravesar la atmósfera. Por lo tanto, podríamos preguntar si aspectos más detallados de la luz transmitida y dispersada influyen en los detalles finos de la recepción del color. La sensibilidad oscuro-luminoso es necesaria para acomodar las grandes variaciones en los niveles de luz que se dan en ambientes naturales debido a la sombra, la nubosidad, las fases de la Luna y la altura variable del Sol en el cielo. Ya hemos visto que la transición de visión adaptada a la luz a visión adaptada a la oscuridad en el crepúsculo apunta a una ventaja adaptativa, pues la discriminación de contraste en el eje de color amarillo-azul tiene sentido si es una adaptación a los colores introducidos en el ambiente por el Sol. El azul del cielo es una influencia primaria, mientras que el centro del resto del espectro solar (después de que se hayan sustraído por dispersión los azules y violetas) es característico de la luz solar directa y, como la cara del Sol, es de color amarillo. La variación azul-amarillo refleja la gama de colores de la luz solar: desde la luz solar directa y vertical a la luz solar azul dispersada que da color al cielo y el agua. La variación rojo-verde en la visión del color también puede estar relacionada con la influencia de la dispersión atmosférica. La porción roja de la luz solar, aunque menos dispersada por las moléculas del aire, es la parte más fácilmente absorbida por el vapor de agua que encuentra en su camino. Así, un aumento del contenido de vapor de agua en la atmósfera produce una reducción en la componente roja de la luz solar que llega a la superficie de la Tierra cuando el Sol está a poca altura sobre el horizonte. Una vez que los rojos han sido eliminados de esta forma, la longitud de onda central de la luz restante está en el verde. Esta vinculación de colores opuestos, como azul y amarillo, por el proceso de promediar lo que queda del espectro después de sustraer parte del mismo, tiene también el efecto de crear un círculo cerrado de variaciones de color, del tipo mostrado en la Figura 4.29.

Las influencias atmosféricas por sí solas podrían haber desencadenado una secuencia de adaptaciones debido a la ventaja selectiva conferida por los

genes que promueven el desarrollo del procesamiento neural para distinguir, de forma simultánea y económica, las tres variaciones de color.

Hay otras influencias ambientales que refuerzan respuestas adaptativas a colores particulares. Los verdes de las hojas son producidos por la clorofila[51]. A los pájaros y los animales que precisan alimento les irá mejor buscando fuentes de alimento que puedan ser fácilmente identificadas en sus entornos naturales. La mayoría de las plantas se propagarán con más éxito si se hacen notar, porque necesitan insectos que las polinicen o se basan en la ingestión y excreción por otros seres vivos para dispersar sus semillas. Hay lugar aquí para la coadaptación de estas dos propensiones en beneficio mutuo. Los verdes de las plantas están determinados por la química; por ello, las bayas y frutos más fácilmente identificables serán aquéllos con fuertes contrastes de color —de los que el rojo es el más llamativo y el más habitual—. Del mismo modo, quienes recogen tales frutos se beneficiarán de una aguda discriminación en el verde y en el intervalo de contraste rojo-verde (Lámina 14).

---

51 En ambientes donde hay una importante disminución estacional en las horas de luz solar, o en su intensidad, las hojas de los árboles de hoja caduca se volverán marrones para producir la mezcla espectacular de marrones, rojos y amarillos que en Norteamérica se denomina «fall» y en Inglaterra «autumn». Después de mediados de verano, los árboles de hojas grandes, como los robles, invierten más nutrientes en su tronco y raíces que en mantener las hojas. Cuando los niveles de luz son bajos y caen las temperaturas, las hojas grandes pierden calor fácilmente a través de sus superficies grandes y no pueden mantener una temperatura suficientemente alta para que las reacciones químicas produzcan un suministro de nutrientes adecuado. Para el árbol es más económico perder las hojas y generar un nuevo conjunto cuando llega la primavera, en lugar de utilizar recursos escasos para retenerlas durante el invierno cuando en cualquier caso hay poca luz que recoger.

Los árboles de hoja perenne siguen una estrategia diferente. Sus hojas son pequeñas y agudas, y presentan una superficie más pequeña desde la que se puede perder calor. Pueden mantener así un nivel útil de actividad química durante los meses de invierno. De este modo, una picea puede mantener sus agujas todo el verano y sacar provecho de ocasionales períodos brillantes de luz solar. En el verano, con sólo agujas estrechas, es mucho menos eficiente en utilizar la luz solar que el roble de hojas grandes, que ha emergido de su hibernación de invierno provisto de un nuevo conjunto de hojas.

Cuando las hojas están verdes a mitad del verano, la clorofila, responsable del color verde, se descompone con el calor, pero se repone constantemente. En otoño, la reposición cesa y los marrones rojizos, antes ensombrecidos por los verdes brillantes, empiezan a dominar.

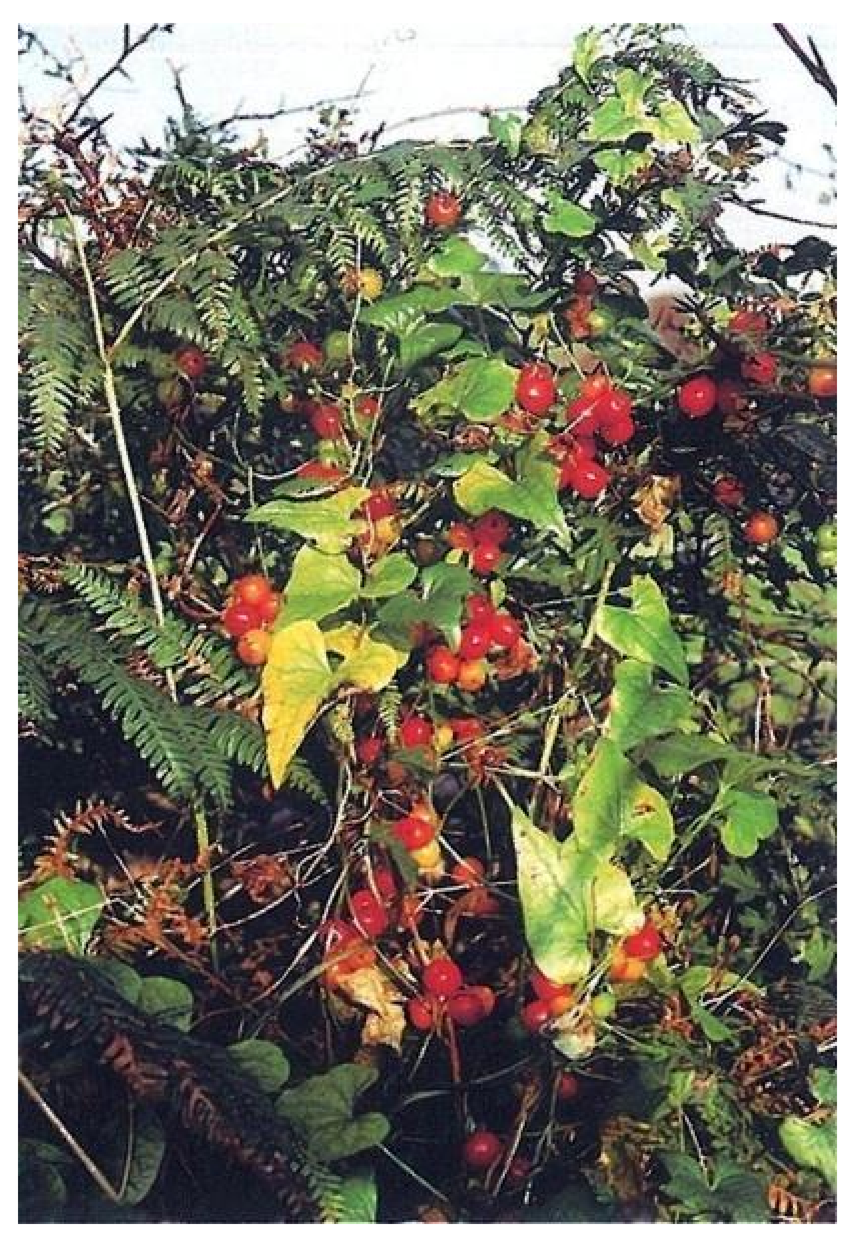


Lámina 14. Bayas rojas entre follaje verde.

Si las fuentes de alimento coloreadas están siendo explotadas por, digamos, pájaros con visión de color, los que lleguen posteriormente al escenario evolutivo (como los primates), y compitan por las mismas fuentes, encontrarán adaptativa una visión del color mejorada. Las criaturas que sólo se alimentan de hierba, o de carne, tienden a ser ciegas a los colores. Relacionada con este uso de la visión del color podría estar la tendencia de nuestro sistema visual a poner colores como el rojo en primer plano y llevar

el azul a segundo término. Es como si hubiera una adaptación al siempre presente telón de fondo del cielo y una ventaja que sacar viendo el rojo primero como un primer término destacado.

El conjunto de colores a la vista en el mundo natural deriva de pigmentos químicos y de los efectos de la luz dispersada. En algunos casos notables el color que vemos deriva de una combinación de ambos. Los efectos de la dispersión de la luz toman tres formas. La difracción, cuando la luz atraviesa una pequeña abertura y pasa junto a un objeto opaco, puede apreciarse en los colores visibles en una tela de araña colgada cerca de una ventana. La interferencia de diferentes ondas luminosas es la fuente del colorido en las finas alas de una libélula y, de modo muy espectacular, en la cola de un pavo real (véase la Lámina 13). Allí, curiosamente, es la melanina en las barbillas de las plumas la responsable de la figura de interferencia óptica. La tercera, y más habitual, contribución de la estructura de la superficie al color natural la ofrece el fenómeno de la dispersión de la luz descubierto por John Tyndall en 1869. El ejemplo más espectacular es el azul del cielo, que Tyndall fue el primero en explicar. A diferencia de los efectos de interferencia y difracción, los resultados de la dispersión de Tyndall no son iridiscentes; es decir, los colores vistos no varían con el ángulo desde el que se ven. Tyndall demostró que cuanto mayor es la frecuencia de la luz (es decir, más azul es el color), más dispersión experimenta por parte de partículas pequeñas. Por esto es por lo que el humo de un cigarrillo seco tiene un tono azulado y por lo que algunos ojos humanos son azules. Minúsculas partículas de proteína en el iris producen dispersión de la luz blanca que entra en el ojo. Cuando uno se hace mayor, estas partículas se hacen ligeramente más grandes y los ojos azules se difuminan. Los colores de los ojos marrones y amarillos son producidos por la presencia de melanina que impide la dispersión (el verde aparece justo en el borde donde el amarillo se combina con el efecto azul). La dispersión de Tyndall es también responsable de las plumas azules del martín pescador y el periquito, y del matiz azul que puede verse en el mentón de un hombre

de pelo oscuro después de que se haya afeitado. La dispersión de Tyndall es también responsable de la coloración de la mayoría de las plumas verdes de los pájaros y de las pieles de muchas ranas y lagartos (la clorofila, que produce los colores verdes de las plantas, no se da en los tejidos animales). Una rana arborícola verde (véase la Lámina 16) es químicamente amarilla, pero el pigmento carotinoide amarillo que contiene actúa como un filtro para la luz dispersada, y la combinación del amarillo con el efecto azul de la dispersión de Tyndall hace que la rana aparezca verde brillante. Si colocamos una rana verde muerta en alcohol, el pigmento amarillo se disuelve y aparecerá azul.

Los pigmentos carotinoides que también dan color a la rana son responsables de los amarillos y naranjas habituales que se ven en plantas, peces y animales. El paradigma lo proporciona la zanahoria, de la que reciben su nombre estos pigmentos, pero sus efectos pueden verse también en objetos tan dispares como tomates, peces de colores y flamencos.

El pigmento más abundante es la melanina negra, que da color a cosas como la piel, el cabello humanos y las plumas de los mirlos. También puede entrar en tonos de marrón, y en general proporciona el telón de fondo contra el cual vemos los azules y Verdes más espectaculares producidos por la dispersión.

Los otros colores naturales comunes son rojos y púrpuras. Los rojos derivan principalmente de la hemoglobina, o su compuesto la oxihemoglobina, que da color a la sangre de los seres humanos y la mayoría de los animales. En las orejas y las regiones nasales de los gatos es responsable de los colores carnosos rosáceos. En crudo se muestra en las carnicerías, donde podemos verla en las células de los músculos de la carne o en las chuletas más vivamente que en la sangre. Cuanto más activa es la existencia de una criatura, más capacidad de transporte de oxígeno requiere, y más roja es su sangre. En consecuencia, las ballenas que se sumergen a gran profundidad tienen una coloración muscular muy oscura, mientras que algunos peces muy poco activos tienen realmente sangre incolora. Finalmente, los

púrpuras, junto con algunos rojos vivos y azules, se dan en plantas debido a una forma disuelta de un pigmento antocianina en la savia. Esta es la fuente de la familiar coloración de los tomates, ruibarbos y uvas rojas, y con ello, y esto es lo más impresionante, del vino tinto.



Lámina 17. Flores generadas por ordenador creadas por Przemyslaw Prusinkiewicz.

Podemos identificar cuatro usos adaptativos del color en los seres vivos. En primer lugar, se utiliza para llamar la atención: por ejemplo, las flores señalan su presencia a los insectos[52]; las frutas de colores señalan que son buenas para comer (Lámina 14). En segundo lugar, advierten: por ejemplo,

[52] Se ha encontrado que la distancia a la que una abeja se orientará hacia una flor es proporcional al tamaño de la corola de la flor. Así, las flores pequeñas o aisladas necesitan tener un color especialmente brillante, con un gran contraste con el follaje verde, para sacar una ventaja reproductiva de no invertir recursos en flores más grandes. Algunas impresionantes flores generadas por ordenador, creadas utilizando simulaciones del crecimiento y deterioro de una planta real, pueden verse en la Lámina 17.

los reptiles con colores chillones señalan que son venenosos (Lámina 15). En tercer lugar, da la posibilidad de camuflaje (Lámina 12) o imitación.

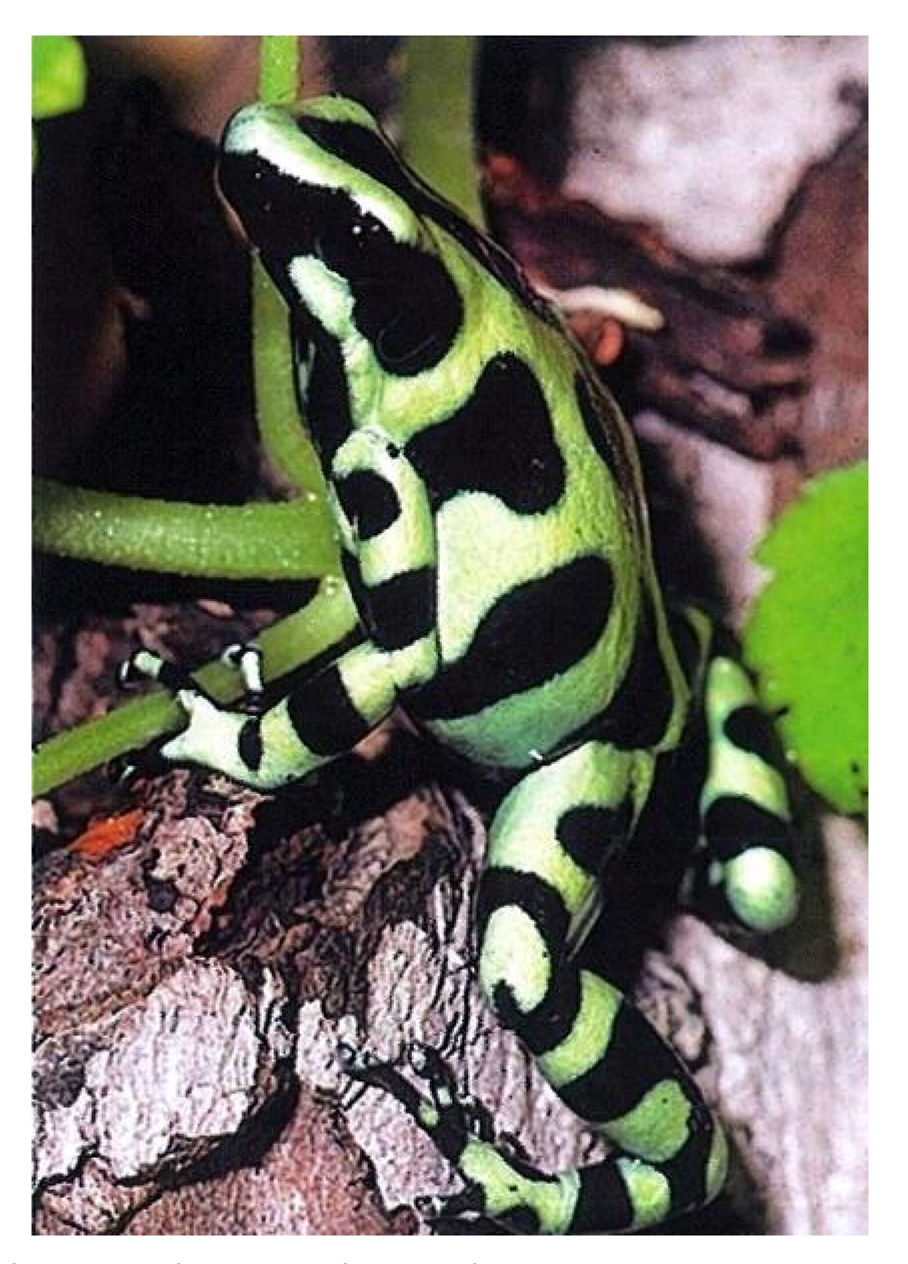


Lámina 15. Color para advertencia: rana venenosa, Venezuela.

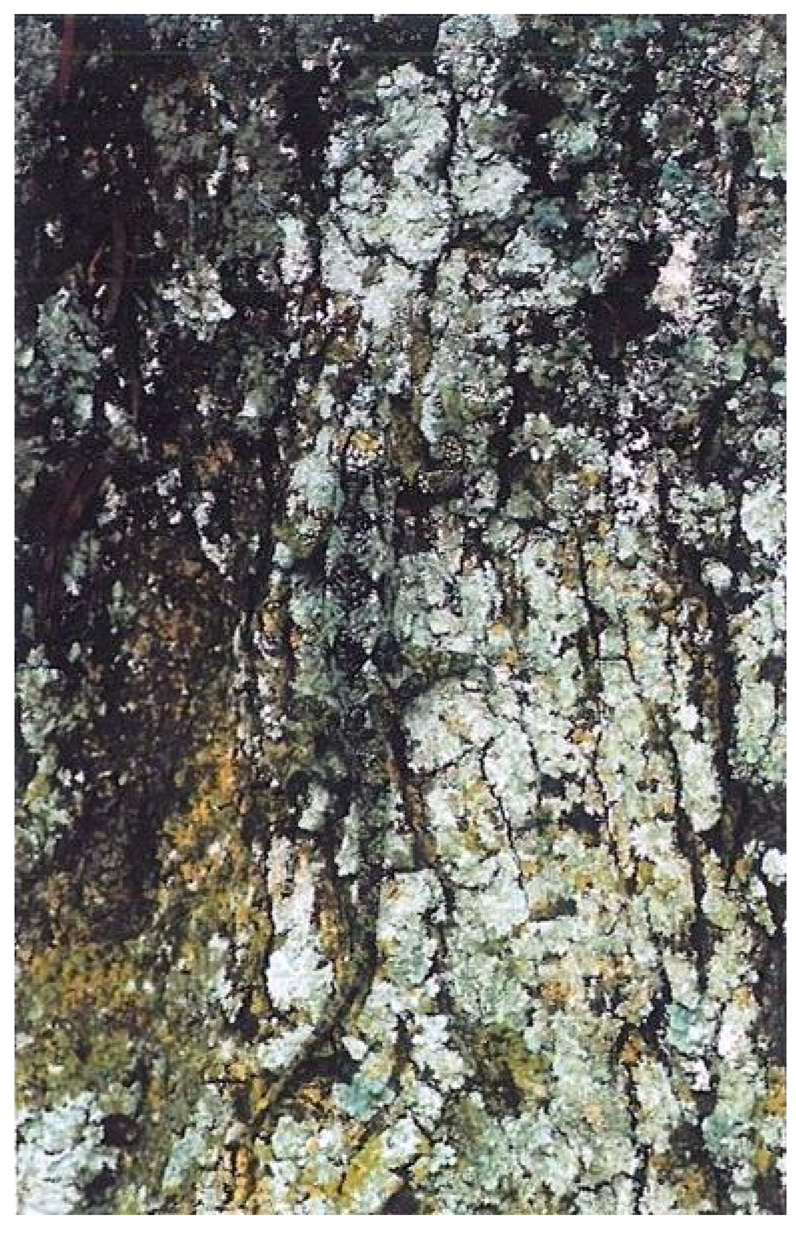


Lámina 12. Color para camuflaje: cabeza de camaleón, Kenya.

En cuarto lugar, actúa como un estímulo para las emociones. Las exhibiciones de cortejo hacen un uso abundante de señales coloreadas (véanse la Lámina 13 y Lámina 21[53]), y los babuinos muestran zonas

---

[53] El pájaro jardinero de cresta naranja (Amblyornis subalaris) es uno de los pájaros más extraños de la Tierra. Del tamaño aproximado de un estornino común, vive sólo en unas pocas selvas montañosas oscuras de Nueva Guinea. La Lámina 21 fue el resultado de las primeras observaciones de estos pájaros construyendo sus emparrados y realizando su posterior cortejo ritual. Esta pintura está basada en una colección de fotografías tomadas en condiciones oscuras durante un período de varias semanas por Heinz Sielmann. El orden y detalle del emparrado es extraordinario. El tallo central del emparrado está construido alrededor dé un árbol joven que ha sido rodeado de

brillantemente coloreadas en sus traseros para indicar su disponibilidad sexual. Como resultado de esta historia, los animales con visión del color responden de forma diferente a colores diferentes. Los monos prefieren el azul al verde y éste al amarillo, y éste al naranja y luego al rojo; normalmente tienen una aversión al rojo y al naranja, pero son tibiamente atraídos por el azul y el verde.

---

musgo aterciopelado. Una divisoria central ha sido marcada por flores amarillas cuidadosamente colocadas, y hay dos colecciones de objetos dispuestas a cada lado del mismo. El lado izquierdo estaba decorado incrustando en el musgo docenas de escarabajos azules iridiscentes, mientras que el lado derecho estaba compuesto de conchas de caracol azules. Esta parte del emparrado es como una exhibición de objetos de valor para llamar la atención de parejas futuras. Cuando pasa una hembra, el macho (a la izquierda en la Lámina 21) exhibe su cresta naranja y danza delante de sus decorados. Si él y todas sus obras son suficientemente impresionantes, ella acabará uniéndose a la danza. La parte delantera del jardín del pájaro está meticulosamente delimitada por filas de frutos coloreados. El borde, está vallado por una red de ramitas estrechamente entretejidas que también ofrecen un dosel protector, impermeable, con forma de cúpula. No hace falta decir que esta obra de arte necesita un mantenimiento constante frente al viento y la lluvia, y la atención de los ladrones. El resultado es una de las creaciones más asombrosas de todo el mundo animal.

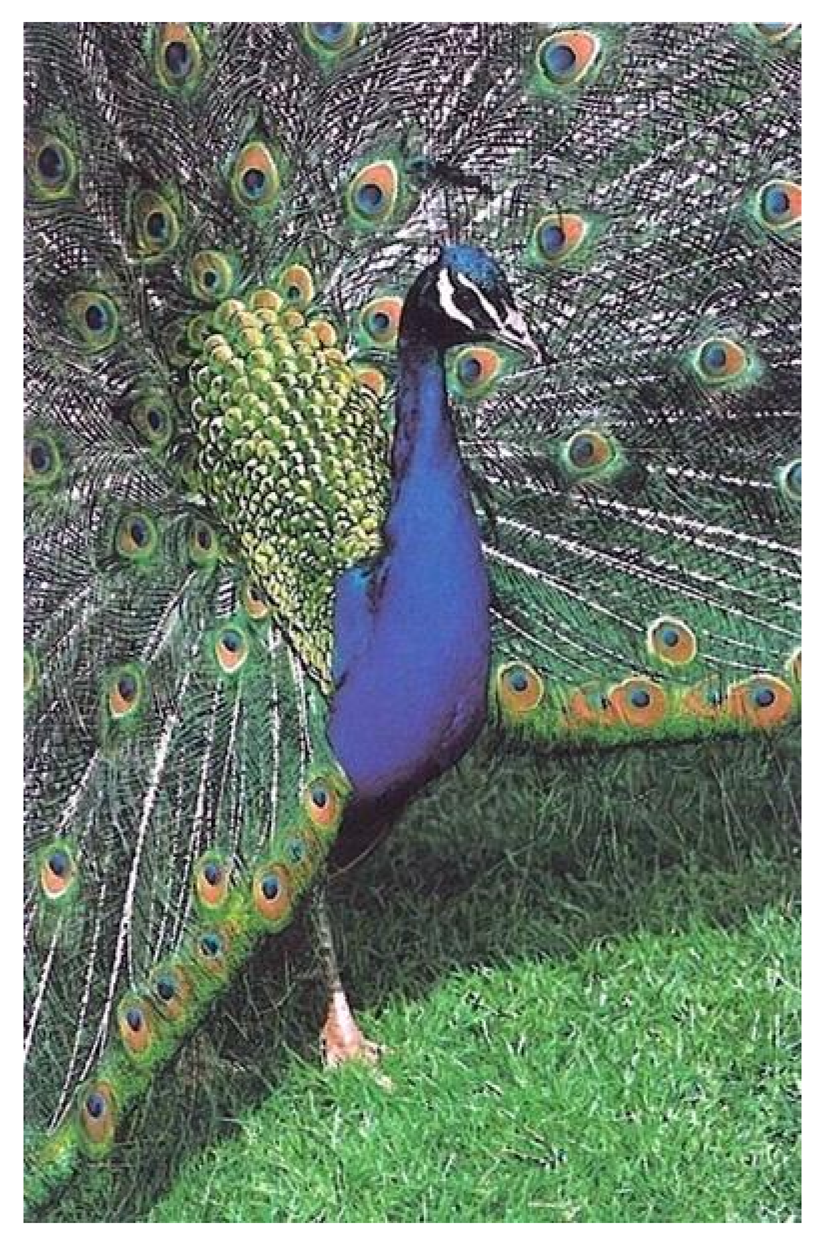


Lámina 13. Color para atracción: el abanico del pavo real.

Una de las características distintivas de los seres humanos es su capacidad, y propensión, a darse color con pigmentos artificiales y objetos coloreados. Desde la pintura de guerra a la cosmética, esta tendencia es un rasgo humano persistente. Tiene muchas funciones, que reflejan las cuatro que acabamos de señalar: el deseo de ser vistos; transmitir información sobre rango y estatus, o advertir del peligro; permanecer invisible, e inspirar admiración, respeto o miedo. Algunos colores se han hecho estimuladores

especialmente poderosos de las emociones. El ejemplo principal es el color rojo, que, como ya hemos visto es el primer color que se añade a los vocabularios humanos tras el negro y el blanco. También es el color más habitual utilizado por pájaros y flores. Su efecto sobre los seres humanos es impresionante: en casos de lesión cerebral, la visión del rojo es la última parte de la visión del color en desaparecer y la primera en reaparecer si hay recuperación. Pero también es intrigante. Indica peligro, como en los ojos de las ranas arborícolas venenosas (Lámina 16), y por eso se suele utilizar como señal de advertencia («rojo para peligro»), pero también se utiliza cosméticamente para aumentar la atracción sexual.



Lámina 16. Rana arborícola de ojos rojos.

¿Por qué tiene este confuso simbolismo dual? Aunque se puede pensar en fenómenos naturales —como las llamas— de color similar que envían señales de seguridad y peligro, Nick Humphrey ha sugerido que es la propia

ambigüedad de nuestra respuesta lo más importante. Parece desempeñar el papel de aumentar nuestra concentración cuando nos preparamos para recibir más información. El mensaje que envía el rojo depende del contexto, y necesitamos reunir más información antes de extraer la conclusión correcta. La propia ambigüedad de la situación, con la posibilidad de una respuesta completamente incorrecta, provoca el estado de atención aumentada que tan a menudo estimula el rojo.

La adaptación evolutiva al color, y las fuertes respuestas que tenemos hacia él, significan que los colores artificiales de nuestro ambiente moderno pueden ser manipulados para producir respuestas concretas. Un ejemplo sorprendente de señales de color poco familiares procedentes de un objeto familiar lo ofrece el animal generado por ordenador que se muestra en la Lámina 20.



Lámina 20. Bestia de Fuego. Una sorprendente imagen digital creada por Ryoichiro Debuchi.

Esto es algo que, sea o no consciente, desempeña un papel en la elección de las decoraciones domésticas o los esquemas de color de aulas, hospitales y

otros edificios públicos. Pese a todo, en su mayor parte, nuestro entorno es una mezcla azarosa de muchos objetos coloreados. Su efecto es diluir nuestra sensibilidad y respuesta a los símbolos de color. Sensible a esta tendencia, Humphrey escribe sobre la apariencia de su estudio y sobre la tendencia masculina a neutralizar la información de color a expensas de otros descriptores.

> *Cuando miro alrededor de la habitación en la que estoy trabajando, el color artificial me grita desde cualquier superficie: libros, cojines, una alfombra en el suelo, una taza de café, una caja de chinchetas —azules, rojos, amarillos, verdes brillantes—. Hay tanto color aquí como en cualquier selva tropical. Pero, aunque casi todos los colores en la selva tendrían significado, aquí en mi estudio casi nada lo tiene. La anarquía de colores impera. Esto ha atenuado nuestra respuesta al color. Desde el primer momento en que a un niño se le da una cadena de cuentas multicolores —pero por lo demás idénticas— para que juegue con ella, se le está enseñando inconscientemente a ignorar el color como señal.*

Cuando enseñamos a niños muy pequeños tenemos tendencia a dar los nombres de las cosas y el número de cosas; raramente hacemos mucho énfasis en sus colores. Cuando consideramos cómo se utiliza el color en la representación artística occidental, resulta sorprendente que su uso como símbolo estuviera tan limitado hasta finales del siglo XIX. Otros tipos de simbolismo han sido mucho más influyentes. Sólo con el desarrollo de la pintura abstracta y otras formas de arte moderno se ha hecho notable el espectacular uso del color como símbolo primario. Uno recuerda el Período azul de Picasso, y la obra de Mondrian, Vasarely y Kandinsky, en la que hay una fuerte llamada a nuestras respuestas innatas a colores concretos. No están siendo utilizados simplemente para suministrar colores «naturales» a

símbolos preñados de otros significados —como es el caso en los paisajes— o simplemente para reproducir los colores de objetos naturales —como frutas y flores— a los que tenemos respuestas innatas. Más bien, se extienden para despertar una reacción instintiva más básica al color. Wassily Kandinsky reconocía que el color cambia el humor y las respuestas de una persona a las imágenes:

> *El color es una fuerza que influye directamente en el alma. El color es el teclado, los ojos son los martillos, el alma es el piano con muchas cuerdas. El artista es la orquesta que interpreta, tocando una tecla u otra para causar vibración en el alma.*

La escuela de diseño alemana de la Bauhaus trató, en los años veinte, de desarrollar una nueva forma de iconografía. Ludwig Hirschfeld-Mack, miembro de la escuela durante mucho tiempo, habla[54] de uno de sus primeros estudios que investigaba las propensiones humanas a vincular formas con colores particulares:

> *Durante aquellos años se mantuvo un seminario muy interesante. Estaba bajo el liderazgo de Paul Klee, Wassily Kandinsky y otros. Querían descubrir las reacciones de los individuos a ciertas proporciones, composiciones lineales y de color... Para descubrir si hay una ley universal de la fisiología que relaciona forma y color, enviamos alrededor de un millar de postales a una muestra de la comunidad pidiéndoles que llenaran tres formas elementales, un triángulo, un cuadrado y un círculo, con tres colores primarios, rojo, amarillo y azul, utilizando sólo un color para cada forma. El resultado fue una*

[54] En *The Bauhaus* (Croydon, Australia, 1963).

aplastante mayoría para amarillo en el triángulo, rojo en el cuadrado y azul en el círculo.

En el Capítulo 2 vimos algo del uso que hacía Georges Seurat de aplicaciones de color puntillistas para producir coloración y sombra con una calidad intrínseca que no pretende verse como si derivase del ángulo o la intensidad de la luz solar. De hecho, Seurat había estado influido por el poeta y Científico Charles Henry, que defendía vínculos entre los estados de ánimo, los colores y las direcciones de las líneas en la composición. Seurat asociaba los tres estados de ánimo de alegría, tranquilidad y tristeza con los colores primarios rojo, amarillo y azul. La alegría también estaba asociada con líneas ascendentes y la tristeza con líneas descendentes, mientras que se sostenía que las líneas laterales transmiten tranquilidad y quietud. Estas recetas pueden verse en acción en una imagen como *La grande jatte* (Lámina 4).

En el diseño moderno se presta mucha atención a la figura y la forma, pero mucho menos al uso del color. No obstante, nuestro sentido innato del color no es menos importante que nuestro instinto para la pauta y el orden, o nuestro deseo de símbolos de seguridad. Para utilizar el color de formas que agraden se requiere una comprensión de cómo se utiliza en la Naturaleza y por qué, y cómo evolucionó nuestro sentido visual para acomodar sus formas naturales. Su presencia es un regalo de la luz solar, un subproducto de la necesidad de los planetas habitables de estar en órbita en torno a estrellas, estar rodeados de atmósferas y pasar la mitad de su vida dando la espalda a su estrella madre. Sin ello, el mundo monocromo sería un lugar menos inspirador. Enterradas bajo capas de aprendizaje yacen nuestras respuestas innatas hacia el color. De cuando en cuando, en momentos de estremecimiento, o de maravilla, emergen sin ser invitadas desde un repertorio que en otro tiempo nos unía a este extraordinario ambiente de aire y cielo, de hojas y agua brillante, bañados a la luz de una estrella llamada Sol.

Salida al exterior. La marcha del mundo

Sé humilde pues estás hecho de tierra.
Sé noble pues estás hecho de estrellas.
Proverbio serbio

Una de las características más interesantes de la pauta del progreso en la ciencia es la forma en que una mayor comprensión de la realidad, y nuestro éxito creciente en predecir sus cambios, se ha desarrollado a la par que se alejaba de la experiencia centrada en el hombre. Cuando buscamos las predicciones más precisas sobre la forma en que funciona el mundo, no las encontramos en nuestros intentos de entender las actividades de la sociedad, las fluctuaciones en los mercados financieros o los caprichos del clima. En su lugar, es en la descripción de las interacciones de las partículas elementales o los movimientos de lejanos objetos astronómicos donde hay que buscar precisiones de una parte en 10^{16}.

Algunos sociólogos de la ciencia han argumentado que la contribución humana a las teorías científicas es el factor dominante en su éxito, no su descubrimiento de una realidad objetiva. Pero si esto último fuera cierto, sería de esperar que nuestras teorías científicas se hagan cada vez menos acertadas cuando se aplican a los extremos del espacio interior y exterior. Esperaríamos encontrarlas más desacertadas cuando se aplican a ambientes que estuvieran muy alejados de la experiencia humana inmediata o las circunstancias a partir de las cuales la selección natural ha conformado nuestros sentidos y sensibilidades durante millones de años. Lo que se encuentra es exactamente lo contrario. Es en la descripción de sucesos fuera del ámbito directo de la experiencia humana donde nuestro poder de predecir y explicar es mejor, y es peor en aquellas áreas más próximas a la intuición y la experiencia humanas, en virtud de su complejidad intrínseca. El

solo hecho de que haya una innegable sociología de la ciencia no significa que la ciencia no sea nada más que sociología.

El curso del progreso científico puede verse como una marcha hacia una concepción de la realidad que está divorciada todo lo posible del sesgo humano. Hay varios hitos en este viaje desde nosotros a la realidad última. En primer lugar, Copérnico nos enseñó que no deberíamos esperar que el mundo dé vueltas a nuestro alrededor —la estructura del Universo no nos garantiza ninguna posición especial en el espacio—. Más tarde Darwin nos enseñó que no somos la culminación de ningún diseño especial, y Lyell descubrió que la mayor parte de la historia geológica de la Tierra ocurrió, de forma bastante azarosa, sin nosotros. Estas ideas no significan que nuestra posición en el Universo no pueda ser especial en alguna forma —no podríamos esperar vivir en un lugar donde la vida sea imposible, como el centro de una estrella, por ejemplo—. Pero nuestra posición no debe ser especial en cada uno de los aspectos. Sabemos que nuestra localización en el tiempo es bastante especial, en un nicho de historia cósmica unos 13 700 millones de años a partir de que empezara la expansión del Universo, después de formarse las estrellas pero antes de que mueran. Por esto es por lo que no deberíamos sorprendernos de encontrar que nuestro Universo es tan grande y tan viejo.

Aún más profunda fue la intuición de Einstein, quien mostró cómo expresar las leyes de la Naturaleza de modo que parezcan iguales para todos los observadores, independientemente de dónde están o cómo se están moviendo. Las famosas leyes del movimiento de Newton no poseían esta expresión universal. Sólo tomaban su forma simple para observadores especiales que se mueven de un modo simple, sin aceleración o rotación. Para estos observadores especiales, las leyes del Universo aparecerían más simples que para otros. Semejante situación antidemocrática era para Einstein una señal de que algo estaba mal en nuestra concepción de las leyes de la Naturaleza. Y tenía razón. Ahora expresamos las leyes básicas de la

Naturaleza de formas que serían encontradas por todos los observadores que investigan el Universo, desde Vega a Vegas, dondequiera que estén, cuando quiera que miren, independientemente de cómo se estén moviendo. Éste es el segundo paso.

El tercer gran paso en el divorcio de la ciencia de la idiosincrasia humana ocurrió cuando se reconoció otro ingrediente. Además de las leyes de la Naturaleza y sus productos, la estructura del Universo que nos rodea está determinada por un conjunto de cualidades invariantes que podemos codificar en una lista de números que llamamos «constantes de la Naturaleza». Estas cualidades incluyen cosas tales como las masas de las más pequeñas partículas subatómicas, las intensidades de las fuerzas de la Naturaleza y la velocidad de la luz en el vacío. Están cuantificadas por medidas cada vez más precisas, y en las contraportadas de los libros de física de todo el mundo se podrán encontrar los últimos valores medidos con un gran número de cifras decimales. En general, estas cantidades tienen unidades —la velocidad de la luz se mide en metros por segundo o en estadios por noche— que suelen ser bastante antropocéntricas: centímetros, pies y pulgadas están convenientemente relacionados con la escala del sistema humano. O también pueden tener un origen geocéntrico o heliocéntrico —días y años son unidades de tiempo que derivan del tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta en torno a su eje y describir una órbita en torno al Sol—. Estas constantes no son ni mucho menos universales. Fueron definidas mediante propiedades de piezas de metal o por las longitudes de metros patrón mantenidos en recipientes especiales en laboratorios en la Tierra. Pero, poco a poco, los físicos se dieron cuenta de que las constantes universales de la Naturaleza permitían definir patrones de masa, longitud y tiempo que no dependían de artefactos concretos hechos por el hombre. Contando las longitudes de onda de la luz emitida por un cierto tipo de átomo, contando sus vibraciones o la masa de su núcleo, es posible definir unidades de longitud, tiempo y masa que pueden ser

comunicadas a través del espacio interestelar a físicos que nunca hayan visto la Tierra o a sus homólogos humanos.

Esta marcha hacia las constantes establecidas de la Naturaleza que no fueran explícitamente antropocéntricas, sino basadas en el descubrimiento y definición de constantes de la Naturaleza universales, puede verse como un paso supercopernicano. El tejido del Universo y la estructura axial de las leyes universales derivaban de patrones e invariantes que eran verdaderamente sobrehumanos y extraterrestres. El patrón fundamental de tiempo en la Naturaleza, tan sólo 10^{-45} de nuestros segundos y definido por las constantes gravitatoria, cuántica y relativista de la Naturaleza, no guarda ninguna relación sencilla con las edades de hombres y mujeres; ningún vínculo con los períodos de días, meses y años que definían nuestros calendarios, y es demasiado corto para permitir cualquier posibilidad de medida directa.

Estos pasos han despersonalizado la física y la astronomía en el sentido en que intentan clasificar y comprender los objetos en el Universo con referencia solamente a los principios que son válidos para cualquier observador en cualquier parte. Si hemos identificado dichas constantes y leyes correctamente, entonces nos ofrecen la única base que conocemos en la que basar un diálogo con inteligencias extraterrestres ajenas a nosotros. Serán la última experiencia compartida por cualquiera que habite nuestro Universo.

La cosmología moderna hace otra sugerencia tentadora sobre la naturaleza del Universo. Antes del nacimiento de la teoría de la relatividad general de Einstein, todas las teorías de la física eran de un tipo similar. Proporcionaban fórmulas matemáticas que podían utilizarse para predecir cómo se moverían o cambiarían las cosas cuando se encontraran con otras cosas. Describían la acción de fuerzas, tales como la gravedad, el magnetismo y el movimiento. Pero, en todos los casos, estas leyes describían las acciones de fuerzas y movimientos en el Universo y dentro de su espacio y tiempo

preespecificados. Ningún movimiento o fuerza podía alterar la naturaleza del espacio o del tiempo. Eran fijos: divinos y eternos.

Einstein cambió todo eso. Su teoría es mucho más sofisticada. Cuando las partículas y sus movimientos se introducen en un mundo gobernado por la teoría de la relatividad general, ellas dictan la propia geometría del espacio y el flujo del tiempo. Este espacio y tiempo curvo dicta cómo pueden moverse la materia y la energía, y el movimiento de éstas dice a su vez al espacio y al tiempo cómo deben curvarse. Es esta característica la que da a la teoría de Einstein su cualidad más notable. *Cada solución a las ecuaciones de Einstein describe un Universo entero.* Algunos son muy simples —demasiado simples para describir nuestro Universo en conjunto, pero muy útiles para describir partes del mismo—; otros son más elaborados y nos proporcionan con maravillosa precisión descripciones de nuestro Universo visible entero. Otros describen universos diferentes del nuestro e imprimen en nosotros la extraordinaria naturaleza de sus propiedades especiales. Oímos hablar mucho de esa descripción precisa del Universo, de su pasado y su presente, y de lo que esperamos en un futuro muy, muy lejano. Pero ha pasado inadvertido lo extraordinario que es que una teoría matemática, un conjunto de rayas hechas con un lápiz en una hoja de papel, pueda ofrecer una descripción de un universo entero. El hecho de que pueda existir una estructura matemática de la cual nuestro Universo entero es un producto particular es bastante sorprendente. No podría haber prueba más fuerte de la inadecuación del materialismo ni argumento mejor a favor de la realidad de una lógica tras las apariencias que es mayor que la propia realidad visible. Es sorprendente que la estructura matemática que parece ser algo más grande que el propio Universo astronómico sea el medio por el que podemos entender su funcionamiento. El Universo puede ser sobrehumano, pero la simplicidad final de la realidad matemática en su corazón es lo que nos permite comprenderlo y tener fe en que nuestra comprensión puede converger en la verdad.

Capítulo 5
La historia natural del ruido

La música crea orden a partir del caos, pues el ritmo impone unanimidad sobre lo divergente; la melodía impone continuidad sobre lo disjunto, y la armonía impone compatibilidad sobre lo incongruente.
YEHUDI MENUHIN

El club de los oficios raros. Paisajes sonoros

La música, sin embargo, como un modo extraverbal de funcionamiento mental, permite una regresión sutil y específica a lo preverbal, es decir, a formas verdaderamente primitivas de experiencia mental sin dejar de ser social y estéticamente aceptable.
HEINZ KOHUT

Ha habido culturas sin capacidad de recuento, culturas sin pintura, culturas desconocedoras de la rueda o de la palabra escrita, pero nunca ha habido una cultura sin música. La música, sonido perfumado, nos rodea por todas partes, está entre nuestras orejas y en las puntas de los dedos; nos hace mover desde la cabeza a los dedos de los pies. Sin aprender conscientemente sus reglas, o adivinar su estructura profunda, podemos responder al ritmo de una nana, ser enardecidos por una llamada a las armas o quedar cautivados por la Quinta Sinfonía de Beethoven. La edad no es una barrera. La capacidad musical entre los muy jóvenes, como también

sucede con el genio matemático, puede ser alarmantemente sofisticada e ir completamente desacompasada con otras habilidades. Pero mientras que nadie encuentra que hacer una larga división aritmética le ayuda a concentrarse en otras cosas, el acompañamiento musical suele ayudamos a completar otras tareas. Una razón para la extensión de la influencia de la música es la enorme gama de niveles y frecuencias sonoras que llenan su pentagrama: desde un tamborileo simple y repetitivo a obras sinfónicas de enorme complejidad, en la que las potencias mentales y la destreza de docenas de individuos se combinan para recrear las pautas codificadas en su partitura.

Los más antiguos instrumentos musicales conocidos se han encontrado en asentamientos de Cro-Magnon en la Europa central y noroccidental. Son flautas decoradas hechas de huesos de mamut y sencillos instrumentos de percusión como castañuelas, y tienen entre 20 000 y 29 000 años de antigüedad. Otros artefactos encontrados con ellos indican que estos instrumentos se utilizaban en la representación de una ceremonia. Todas las culturas humanas conocidas tienen prácticas musicales bien desarrolladas.

Cuando encontramos actividades humanas transculturales —como escribir, hablar y contar— que muestran muchas características comunes, es conveniente tratar de ver cómo dichas actividades podrían haber evolucionado a partir de otras más sencillas cuya persistencia es biológicamente ventajosa. Si el precursor sencillo de la actividad compleja de hoy dotaba a sus poseedores con una clara ventaja en la vida —porque los hacía más seguros, más sanos o simplemente más felices— entonces es probable que se extienda debido a su transmisión cultural, o si deriva de algún rasgo genético heredable que aumenta la fecundidad, lo hará debido a que es más probable que sobreviva y sea heredado. En definitiva, tratamos de identificar aspectos del mundo físico que se imprimen en la mente humana con firmeza creciente durante generaciones, porque una fiel

impresión mental de ellos reduce los riesgos para la vida que crean los cambios en el entorno.

A primera vista, no es fácil ver qué ventaja confiere una predilección por Beethoven o por los Beatles. ¿Cuál podría haber sido la utilidad de una forma tan abstracta y elaborada de generar y apreciar el sonido? No hay una respuesta sencilla. Nuestras impresiones están recubiertas de muchos miles de años de complejidad e idiosincrasia crecientes. Estas preguntas no se limitan al origen de la música. Podemos plantearlas a propósito de todas las bellas artes. Si pudiéramos prescindir de nuestros embellecimientos culturales, podríamos ser capaces de ver sus comienzos en prácticas más prosaicas que son ventajosas para sus practicantes. No obstante, incluso si ayudaron a la supervivencia en el pasado lejano, esto no significa que tengan que desempeñar ahora un papel similar.

La pintura parece ser un producto natural de la falibilidad de la memoria humana y de la necesidad de comunicar. Las imágenes pueden transmitir información sobre los paraderos del alimento o sobre el peligro; permiten que una familia, o un grupo, hereden y acumulen experiencia. Esto no niega que encontremos otros imperativos menos familiares en las mentes y los corazones de los constructores de imágenes. En tiempos antiguos no solía haber ninguna divisoria abrupta entre el objeto que se estaba representando artísticamente y la propia representación. Muchas culturas creían que fabricar o poner nombre a una imagen les daba poder sobre ella. De tales creencias surgieron muchas tradiciones y prejuicios sobre nombrar a objetos y personas. Una cultura influyente, la de los primeros hebreos, se abstenía de hacer cualquier imagen artística de seres vivos —incluso si se dedicaban a la música con notable entusiasmo.

La literatura y la escritura creativa también parecen tener precursores naturales en la búsqueda de bienestar y cohesión social que puede satisfacer una historia oral, o en la narración de historias en las que los oyentes aparecen con un papel destacado. Tales historias sirven para desarmar a lo

desconocido; dan significado a la vida, hacen retroceder las fronteras de lo desconocido y estimulan la autoconfianza que llega cuando se da sentido al mundo. Su efectividad aumenta al volver a narrar y, como resultado, la importancia de las cosas narradas aumenta de forma segura y constante.

Estas actividades son ventajosas si la información que encierran sobre el mundo es verdadera y útil. Pero las creencias falsas también pueden ser útiles, siempre que no inspiren actividades fatales; también ellas pueden estimular la cohesión social y las creencias compartidas. Este espíritu comunitario genera entereza frente a las presiones exteriores. El conocimiento de que las hazañas históricas son registradas y reverenciadas alienta actos de valentía y autosacrificio que de otra forma serían contrarios al sentido de autopreservación del individuo.

En las artes plásticas, como la escultura, es fácil ver un vínculo con el desarrollo de habilidades ventajosas. La fabricación de herramientas, armas, arpones y puntas de lanza era una actividad en la que los mejores diseños, los materiales más robustos y los procesos de manufactura más económicos eran cuestión de vida o muerte para los participantes. La construcción de refugios estimulaba la explotación de diversos materiales, desde arcilla hasta madera, piedra y metales. Estos materiales tienen un espectro de texturas y propiedades que requiere la invención, evaluación y refinamiento de diversas técnicas. Había otras razones para dar forma a elementos del mundo: la búsqueda de trascendencia personal, la celebración de la fertilidad humana y el culto a las fuerzas manifiestas de la Naturaleza; todas parecen presentar un deseo de fabricar imágenes. Ídolos y deidades suficientemente pequeños para caber en nuestra casa, o alrededor del cuello, abundan en culturas primitivas en todo el mundo —de hecho, persisten también en el mundo moderno—. Y asimismo, la confección de reliquias desempeña un papel poderoso, aunque a veces irracional, en cohesionar pequeñas comunidades de maneras que las distinguen de otros grupos.

Otra actividad que puede verse a esta luz pragmática es la de la danza. Cuando quiera que hay necesidad de actividad frenética o sensibilidades aumentadas —en la preparación para la guerra, en celebraciones de fertilidad o de nacimiento, o en velar a los muertos— los giros rítmicos de la danza primitiva unen a la gente en una experiencia compartida. La comunidad entera parece más grande que el agregado de sus partes; el individuo se hace parte de un movimiento dinámico mayor que está ligado, por solidaridad, al grupo. Estas prácticas ofrecen ventajas que no son accesibles para los de fuera. Destilan orden y confianza mutua, barren la inseguridad y la duda que genera la introversión; pero, por encima de todo, ofrecen condiciones iniciales plausibles a partir de las que puede florecer y crecer parte de la rica diversidad de la civilización.

La ubicuidad de la danza suele estar ligada a intentos por entrar en contacto con los poderes espirituales. Los antropólogos informan de que es habitual que los espíritus sean conjurados por golpes de tambor. En consecuencia, hay normalmente un vínculo estrecho entre el sonido de un tambor y la señal de un muerto. El tamborileo rítmico tiene un poderoso efecto sobre nosotros, e invariablemente indicamos aprobación o desaprobación haciendo chocar nuestras manos. Cuando el tamborileo es grave, sentimos las reverberaciones además de oírlo. Es fácil creer que estos sonidos habrían sido los primeros que los humanos crearan artificialmente. Son simples de producir. Pueden hacerse sólo con las manos, o utilizando palos y piedras. La percusión es un fenómeno primario. Siempre está presente en las antiguas ceremonias de iniciación o en los intentos por entrar en contacto con otros reinos. El tamborileo parece ayudar a alcanzar estados de éxtasis o trance, y anima a actividades colectivas sincronizadas como la danza. Pero quizá el latido interno del corazón humano es también importante. En cualquier actividad enérgica, la palpitación del corazón se haría notable. Su tamborileo ligaría estas excitantes actividades a su ser interior. El impulso sexual que proporcionan estas actividades las habría hecho ciertamente adaptativas —y

aún encontramos un vínculo íntimo entre exhibición sexual y música fuerte y rítmica—. Pero el sonido rítmico también podría ayudar en el proceso de aprendizaje. Si ciertos recuerdos pudieran ser reforzados por una rúbrica emocional se retendrían más fácilmente («el efecto todo-el-mundo-puede-recordar-qué-estaba-haciendo-cuando-se-enteró-de-que-J.-F.-Kennedy-había-sido-asesinado»).

Es posible que la música fuera originalmente un lenguaje especial para entrar en contacto con el reino celestial. El sonido parece ser siempre el medio a través del que entramos en contacto con los dioses. El ruido del viento y el trueno sugiere que los dioses hablan con una fuerza espectacular. Muchos rituales y ceremonias primitivos tenían lugar tras la llegada de la oscuridad, cuando el oído es relativamente más importante como órgano sensorial. Una persona ciega podía participar en un ritual antiguo; una sorda no podría. (La palabra latina *surdus,* que significa sordo o mudo, es el núcleo de nuestra palabra «absurdo»).

La música nos invita a explorar los antecedentes a partir de los cuales podría haber evolucionado o surgido accidentalmente su apreciación. Hay muchas posibilidades. Los sonidos humanos más primitivos y espontáneos son los llantos de un niño cuando nace, cuando está hambriento o disgustado —sonidos a los que respondemos en circunstancias de gran intimidad—. Se ha sugerido que estos llantos imprimen en nosotros una sensibilidad hacia sonidos concretos, y desarrollan una disposición hacia sonidos musicales. Pese a todo, seres humanos de todas las edades retienen una capacidad para producir sonidos y gritos emocionales no muy diferentes de los llantos de un niño para llamar la atención, y no hay similitud entre estos llantos y la música. Reconocemos nuestra reacción instintiva a gritar como una reacción de irritación, incomodidad o disgusto —igual que la reacción que cabría esperar que hayan impreso estas experiencias sobre nuestros ancestros— y no la respuesta que la mayoría de las formas de música despiertan en nuestra mente. A pesar de esta diferencia, hay innegablemente algún

condicionamiento prenatal del feto humano a los ritmos corporales de la madre, porque éstos son suficientemente regulares para ser reconocidos en presencia de otros ruidos irregulares. Además, estos ritmos corporales ponen limitaciones precisas a nuestra música. La división de las melodías en frases musicales tiende a producir intervalos de tiempo que son similares al ciclo de la respiración humana; una aproximación aún más estrecha a este ciclo tiene lugar si en la producción del sonido están involucrados el canto o los instrumentos de viento. Un resultado del crecimiento de nuestros cuerpos es que el pulso se hace más lento con la edad. Probablemente no es casual que las personas jóvenes se sientan muy cómodas con un ritmo musical más rápido que el que les gustará en una edad más avanzada. Si la música apareció inicialmente como un acompañamiento a la danza, el ritmo de la primera música habría estado dictado por la frecuencia con que podrían hacerse diferentes movimientos rítmicos.

Otra clave para los antecedentes de la música podría estar en su poder emocional —un poder que crece con una exposición repetida—. En civilizaciones antiguas y modernas, en todo el mundo, encontramos el sonido de la música cuando quiera que hay una necesidad de aumentar los lazos grupales o inspirar actos de valor. Crea una atmósfera dentro de la cual ideas y señales pueden causar una fuerte impresión en la mente. Pero aquí hay una paradoja, pues encontramos que la música puede tranquilizar la mente agitada tanto como puede exaltarla. Esta dicotomía sugiere que no encontraremos la fuente de cualquier representación musical, o apreciación musical, en una función tan específica como la excitación o la pacificación. Tal vez, como comentamos cuando consideramos nuestras respuestas encontradas al color «rojo», esta ambigüedad es en sí misma el objeto más importante de nuestra atención. La música es utilizada a veces por los psicoanalistas como una forma de terapia para pacientes mentalmente perturbados. Esta tradición se remonta al menos hasta Sigmund Freud, quien, pese a odiar la música, la consideraba como un vehículo que podía

liberar tensiones mentales y acelerar el retorno de la psique a ese equilibrio, que, para él, estaba tipificado por la íntima unión de la madre y el niño.

Puesto que nuestra percepción actual de la música está oscurecida por el amplio abanico de medios mediante los que se ejecuta, y por las notaciones simbólicas que utiliza, no debemos olvidar que la primera música fue la que ahora llamaríamos «música folk»: música que no había sido deliberadamente compuesta o escrita. No estaba hecha para su estudio o apreciación a la manera moderna; se oía sólo para aprender a participar en su ejecución. Tales formas de música desempeñaban un papel social que ahora se considera un aspecto menor de la ejecución musical —a menos que uno sea un aficionado al fútbol—. Este cambio de papel muestra que la música se ha convertido en una forma altamente estructurada. Ha evolucionado hasta alejarse mucho de su función original. Y, al hacerlo, se ha hecho la más teórica y formalmente estructurada de nuestras formas artísticas mayores. Mientras que el pintor o escritor futuro puede empezar de repente una ambiciosa obra creativa, el aspirante a músico debe sumergirse más profundamente en las reglas y teoría de la música antes de que sea posible cualquier comienzo coherente. Pero, a pesar de la disciplina especial que requiere de sus compositores e intérpretes, la música puede ser apreciada sin ningún estudio. Más que cualquiera de las artes, ofrece grandes recompensas a cambio de poca o ninguna inversión previa en conocimiento.

Una ubicua fuente de sonido es el mundo natural inanimado: el viento, el ruido del agua que corre o el choque del trueno. Pero ¿tienen algo que ver con la música? Ciertamente hay muchos sonidos en la Naturaleza, pero la mayoría son sonidos que dificultan la comunicación humana; no son plantillas para la emulación humana. Sólo se copian en circunstancias muy específicas —en intentos de camuflar nuestra presencia mientras cazamos, o para ocultamos de los enemigos— y estas actividades pueden distinguirse fácilmente de lo que es hacer música. Pueden oírse sonidos más armoniosos en otros lugares del mundo viviente. Las llamadas de apareamiento y los

complejos cantos de las aves desempeñan un papel clave en el proceso evolutivo: con ellos se señala la disponibilidad sexual, se atrae a las parejas y se demarca el territorio.

El canto de las aves resulta ser muy elaborado. Hay una pauta definida de desarrollo a medida que el ave madura, que culmina en su canto final. Superficialmente, esto no es diferente del desarrollo paso a paso del lenguaje en los niños. Algunas especies de aves exhiben sólo un canto local, y todas las aves lo aprenden; otras exhiben una gama de cantos y «dialectos» diferentes que están influidos por condiciones ambientales locales. (Los «cantos» de la ballena son similares a este respecto). Estudios neurológicos de las aves revelan que su capacidad canora está localizada en la parte izquierda de su cerebro; una lesión en esa parte del cerebro de un ave elimina su capacidad para cantar. Los cantos de una especie particular no son innatos, porque aves de una especie pueden aprender los cantos de otra. Las aves domesticadas pueden ser expuestas a «cantos» humanos, y los aprenderán sin ninguna resistencia instintiva. En la Figura 5.1 se muestran algunas transcripciones de cantos de aves hechas por el biólogo William Thorpe.

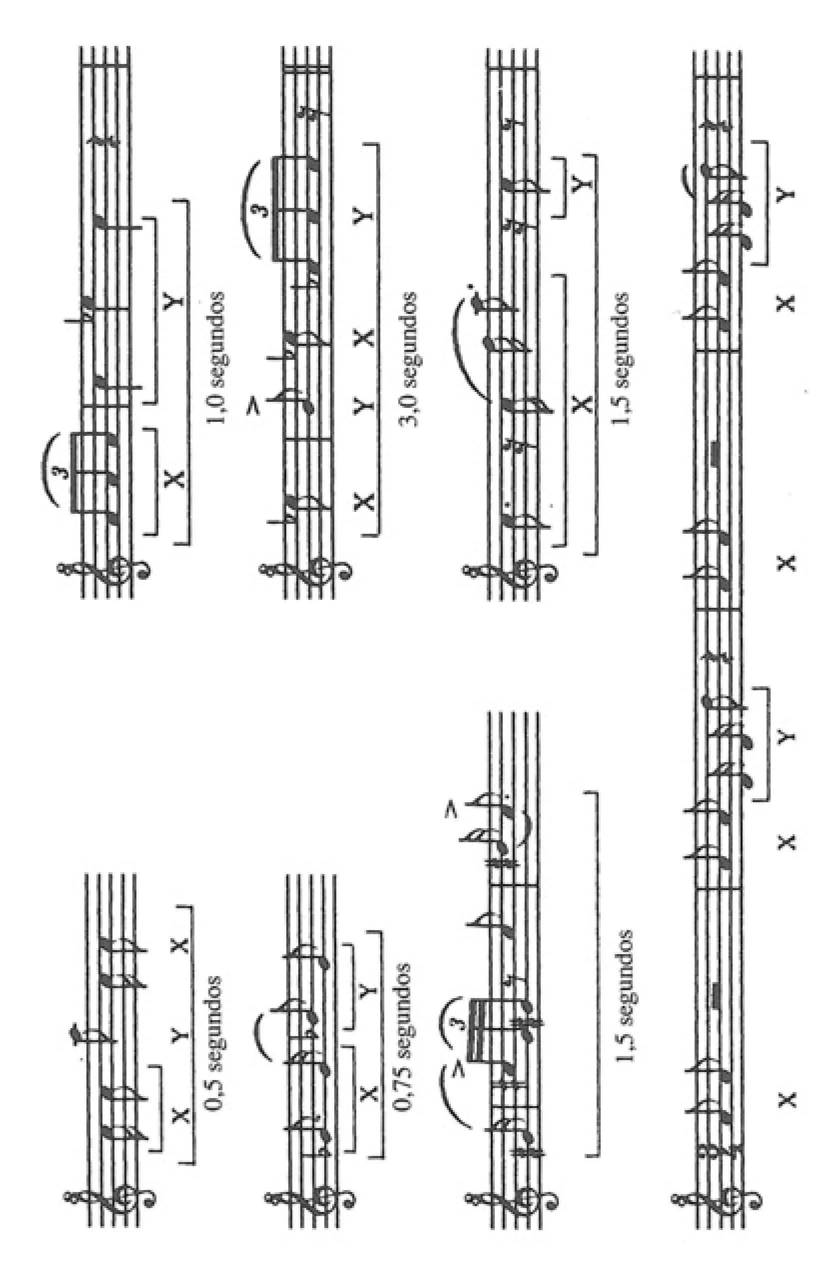


Figura 5.1. Siete fragmentos de canto de pájaros, registrados por William Thorpe. Las parejas de alcaudones africanos cantan duetos compulsivamente. Uno de los dos sexos empieza el canto, y canta todo o sólo una parte del mismo. Alternativamente, ambos pájaros pueden cantar toda la canción al unísono. Estas partituras muestran extractos de diversas duraciones. Las contribuciones de los dos pájaros a las canciones están señaladas por X e Y.

Charles Darwin defendía el intento de explicar la música apelando a su posible origen en las llamadas de apareamiento. Puesto que la música tiene un poderoso efecto emocional en nosotros, quizá derive de actividades asociadas con intentos de atraer a las parejas, con todas las emociones exacerbadas y sentimientos negativos de celos que los acompañan. Incluso ahora, algunas canciones están asociadas con sentimientos de amor, especialmente la tristeza por su pérdida o por el amor rechazado. Darwin creía que la música era un precursor primitivo del lenguaje, cuya primera función era la atracción de parejas, a partir del cual evolucionó posteriormente una capacidad lingüística sofisticada. Las llamadas y cantos de apareamiento son ejemplos de selección *sexual,* más que de selección natural. Al igual que las exhibiciones de cortejo, desempeñan un papel en atraer parejas, pero ahora no necesitan dar información sobre los atributos genéticos de quien los exhibe (aunque pueden hacerlo en algunos casos: el pájaro jardinero macho [Lámina 21] que ha construido el nido más grande y más elaborado será probablemente el más apto y más fuerte; el sapo amoroso con el croar más profundo será también el más grande).



Lámina 21. El extraordinario emparrado del pájaro jardinero de cresta naranja (Amblyornis sabalaris).

La selección sexual afecta a los rasgos externos de nuestra constitución que influyen en las preferencias sexuales, y por ello cualquier forma de arte que copie o embellezca dichas formas extrae muchas de sus idiosincrasias de la selección sexual antes que de la natural. Pese a todo, incluso si una forma de arte se origina de esta manera, puede evolucionar posteriormente utilizando representaciones que no son visualmente atractivas para transmitir un mensaje al espectador o al oyente. De esta manera, el arte se separó de los imperativos de la selección sexual. El filósofo Victor Zuckerkandl veía claramente que la belleza, aunque a menudo suficiente para el arte, no es en modo alguno necesaria para conseguir sus objetivos:

El arte no se dirige a la belleza; *utiliza* la belleza, en ocasiones; otras veces utiliza la fealdad. El arte, no menos que la filosofía o la ciencia o la religión, o cualquier otra de las empresas superiores de la mente humana, se dirige en última instancia al conocimiento, a la verdad.

Hasta finales del siglo XVIII, los filósofos se ejercitaban mucho en debates acerca de en qué medida el arte en general, y la música en particular, copia la Naturaleza y la vida. Para nosotros, esto parece una perspectiva estrecha. Pues, aunque hay una plétora de sonidos en el mundo natural, éstos parecen tener poco en común con las pautas de tonos que encontramos tan agradables y que no han dado lugar a una forma específica de oyente instruido. La Naturaleza casi nunca da lugar a tonos musicales. La apreciación de la Naturaleza se centra más a menudo en su serenidad que en el retumbar del trueno o el rugir del viento.

Sentido y sensibilidad. Cuestión de coordinación

Nada me tranquiliza más después de un largo y exasperante curso de recitales de piano que sentarme y que me taladren los dientes.

GEORGE BERNARD SHAW

La mente ha encontrado maneras de dar sentido al tiempo uniendo cadenas de sucesos en una historia. Este papel fue desempeñado inicialmente por leyendas y tradiciones, que complementaban la capacidad de la mente para dar sentido al espacio que le rodeaba. El orden espacial manifiesto en la pintura o la escultura se realza cuando se le dota de un aspecto temporal. Las películas suelen ser más atractivas que las fotografías estáticas, y hoy los niños son prácticamente adictos a los videojuegos. Las imágenes que no cambian dejan que los espectadores busquen por sí mismos. Pueden mirar una y otra vez, siguiendo primero una secuencia exploratoria, y luego otra[55].

[55] Hay excepciones concretas, como los frisos estructurados o las imágenes del op art. En los primeros, la simetría es tan abrumadora que el cerebro es atraído. En el op art se explotan algunos de los atributos de reconocimiento de pautas del cerebro, a los que se confunden con ambigüedades deliberadas. Por ejemplo, tendemos a unir los puntos, creando líneas imaginarias entre unos puntos y sus vecinos más próximos. Pero si se crea una pauta en la que algunos puntos tienen más de un primer vecino equidistante, entonces el ojo saltará alternativamente de una a

Pero la música impone su propio orden perceptual. Tiene un comienzo y un final. Una pintura no lo tiene.

La apreciación musical puede estar asociada a una propensión de la mente a estructurar el tiempo para ordenar y almacenar la información. Hacer música es más complejo, porque requiere la acción coordinada de diferentes extremidades o músculos. Así pues, podría ser que nuestro gusto por la música sea meramente un subproducto de una adaptación ventajosa a las acciones coordinadas. ¿Qué tipo de ventaja podría ofrecer tal adaptación?

La «coordinación» yace en el corazón de todo tipo de actividades humanas, desde lanzar balones de fútbol a andar en bicicleta. Todas nuestras actividades complejas —las que requieren una meticulosa coordinación del ojo, el cerebro y la mano— se convierten en actos de exquisita coordinación secuencial cuando se examinan en detalle. Consideremos algo tan «simple» como cruzar la calle. Recibimos información visual y sonora de los vehículos que se mueven con respecto a nosotros en varias direcciones y a velocidades desconocidas. Tenemos que evaluar si hay un intervalo entre vehículos sucesivos durante el que podamos cruzar la calle con seguridad; entonces debemos movemos a una velocidad apropiada para llegar al otro lado —permaneciendo abiertos a la posibilidad de que tengamos que actualizar toda la información anterior si sucede algo inesperado—. No sólo podemos hacerlo instantáneamente, en carreteras con curvas y pendientes, y en condiciones de visibilidad variable, sino que podemos mantener una conversación y comer un helado al mismo tiempo. El cerebro ha desarrollado claramente una facilidad extraordinaria para la coordinación secuencial y paralela de diferentes movimientos, y los combina para producir una única actividad continua como la que se requiere para servir una pelota de tenis. Quienes practican deporte de competición reconocerán que esta facilidad de coordinación puede mejorarse por repetición cuidadosa. Un velocista que no

---

otra de las dos posibles líneas imaginarias entre vecinos más próximos y la imagen puede parecer dinámica (véase la Figura 3.5).

haya hecho ninguna carrera rápida durante un tiempo encontrará, al volver a correr, que su acción de esprintar se ha hecho bastante torpe y desigual. Cuando el cerebro envía señales a las extremidades, se transmiten demasiadas instrucciones y el rápido movimiento hacia adelante se ve interferido por todo tipo de otros movimientos no deseados: se tensan músculos innecesarios, la cabeza se balancea y los brazos se agitan de formas indeseadas. Pero, corriendo muchas veces al máximo nivel, el sistema nervioso suaviza poco a poco las cosas y descarta movimientos improductivos. De este modo, puede condicionarse al cuerpo para poner en juego sólo la secuencia óptima de movimientos esenciales. Esta actividad se denomina «entrenamiento». De hecho, en algunos deportes técnicos es posible mejorar la ejecución de complicadas secuencias de movimientos con la simple visualización del ejercicio.

Continuidad y sincronización son las claves para un ejercicio físico complejo. La interpretación de la música está ligada al desarrollo de la facilidad del cerebro para combinar acciones que requieren delicadas habilidades de coordinación. Una teoría popular del desarrollo de la conciencia, defendida por Gerald Edelman, ve el cerebro como un sistema que sigue evolución darwiniana explorando muchas posibles interconexiones neurales, algunas de las cuales se muestran más beneficiosas que otras. Estas conexiones se refuerzan con el uso, a expensas de otras. El espectro de actividades mentales en las que se compromete el cerebro influye claramente en su propensión a ciertas variedades de asociación. Quizá la forma de coordinación, asociación y organización temporal que refleja la música desempeña un papel importante en todo el proceso de darwinismo neural, lo que da sustancia a la famosa afirmación de Igor Strawinsky de que «la función exclusiva de la música es estructurar el flujo del tiempo y poner orden en él... la música es el arte de la permutación del tiempo».

Muchos animales poseen una coordinación superior: los monos ejecutan ejercicios gimnásticos que nosotros no haríamos ni en sueños, y un oso

puede pescar un salmón en una rápida corriente con una regularidad que haría llorar de envidia a un pescador, pero ninguno de los dos animales parece ser terriblemente musical. Esto sugiere que la intuición musical está más íntimamente ligada a una habilidad característicamente humana, como el lenguaje —que es también un triunfo de coordinación entre el cerebro, los pulmones, los músculos del tórax, la laringe, los músculos faciales y los oídos—. De la misma forma que parece haber una programación genética universal de los seres humanos que les dota de habilidades lingüísticas, también podría haber una gramática musical universal que desempeña el mismo papel para las pautas sonoras. Pero, puesto que la capacidad musical está mucho menos repartida, es más verosímil creer que fue un subproducto de una primitiva programación para el lenguaje antes que un elemento de programación independiente.

Antes de dejar el vínculo entre música y ordenamiento temporal, deberíamos advertir que esta asociación creó un profundo problema teológico para los pensadores cristianos medievales. Entraba en sus debates sobre la naturaleza de Dios y su relación con el tiempo y la eternidad. La música creaba un dilema porque, si Dios reside en una eternidad intemporal trascendente, la música no puede formar parte de la esencia divina; pues sin el paso y latir del tiempo no podía haber música. Pero las referencias bíblicas a los coros celestes de ángeles, la importancia de la música en el culto y una creencia en que no podíamos ser más privilegiados que Dios sintiendo la música cuando Él no lo hace, llevó a otros a concluir que Dios debe compartir la temporalidad necesaria para la apreciación musical.

Música incidental. ¿Un subproducto inocuo?

La música es esencialmente inútil, como lo es la vida; pero ambas tienen una extensión ideal que presta utilidad a sus condiciones.

GEORGE SANTAYANA

Nuestros sueños ofrecen una ventana a los intentos de la mente por unir experiencias y sucesos. Si usted se ha embarcado alguna vez en un proyecto que requiere referencias cruzadas de la información contenida en muchas páginas —ya sea para completar su declaración de Hacienda o para escribir un ensayo— apreciará ese maravilloso sentimiento catártico que llega cuando el proyecto está terminado y se pueden desechar todas las hojas sobrantes. Los sueños se parecen a un proceso similar de exploración, ordenamiento y asociación: un proceso que une experiencias recientes a experiencias del pasado. A veces, los vínculos tienen lugar sólo en puntos singulares, y producen yuxtaposiciones incongruentes en otros lugares: los intentos de lamente por interpolar entre sucesos singulares para crear una «historia» suelen producir resultados extraños. Quizá la música nos afecta de modo tan profundo porque resuena con una tendencia similar de la mente subconsciente a ordenar nuestras experiencias auditivas. Para que esta reorganización de los estímulos exteriores tenga lugar, sirve de ayuda que estén temporalmente aislados de influencias externas. La música ofrece esta protección y, con ello, ayuda a la mente a ordenar la información. El sentimiento de expectación, seguido de una resolución de las tensiones despertadas por una compleja pieza musical, puede estar asociado a una pauta similar de actividad en el nivel neurológico. La experiencia de la música despierta nuestros sentidos a formas particulares de sonido ordenado. Al resonar con las naturales actividades contables del cerebro, la música se percibe como algo relajante, vigorizante y agradable.

Muchas personas encuentran más fácil estudiar o realizar actividades lingüísticas y prácticas con un fondo musical. Es como si algunas de las actividades de ordenación del cerebro se mantuvieran mejor ocupadas procesando señales sonoras para que no interfieran con la tarea que se está realizando. Alternativamente, el bajo nivel de procesamiento extra requerido

para asimilar una fuente de información ya bien ordenada, como ciertos tipos de música, puede mantener las cosas en marcha de un modo que mejora la concentración y la eficiencia del procesamiento. Se ha dicho que la puntuación en un test de inteligencia mejora cuando los candidatos tienen como fondo una música de Mozart. Y, de hecho, se dice que el propio Mozart pedía a su mujer que le leyera mientras estaba componiendo, como para distraer al lado izquierdo del cerebro procesando el habla mientras el lado derecho componía sin trabas. En la misma línea, se dice que Carl Orff no admitiría a un muchacho en Los niños cantores de Viena si ya hubiera aprendido a leer y escribir —pensando, se supone, que ya se había perdido la oportunidad para hacer que el lado del cerebro que procesa la música dominara sobre el lado que procesa el lenguaje.

Ya hemos visto que, a pesar de su elevado estatus artístico, la capacidad musical quizá no «sirva para» ninguna otra cosa. Podría ser una elaboración completamente inútil de una capacidad destinada a alguna otra cosa. Si al cerebro le gusta ordenar información asociando factores comunes, entonces la importancia emocional de una pieza musical para el oyente puede derivar básicamente de un contexto en el que fue oída alguna vez. La marcha nupcial de Mendelssohn, el himno nacional o una bien conocida cancioncilla de un anuncio impresionan emocionalmente porque evocan recuerdos de exposiciones anteriores a la misma canción y recrean algunos de los sentimientos pasados asociados con ellos. Desde esta perspectiva, la forma y contenido de una pieza musical es completamente irrelevante para el carácter emocional que percibimos en ella. Más bien, dicho carácter está enteramente determinado por el contexto en el que es oída. Esta visión de la música ha sido bautizada como la teoría «Querido, están tocando nuestra canción». Pero es difícil creer que el significado de la música esté enteramente determinado por el contexto de esta manera, aunque sólo sea porque podemos entender algo de la estructura y «significado» de una pieza musical sin ser emocionalmente conmovidos por ella. Además, las personas

con bases culturales similares pero diferentes historias personales pueden responder de formas similares cuando oyen la misma pieza musical por primera vez. El contexto es evidentemente importante, pero no es invariablemente de importancia suprema.

Otra objeción a una interpretación puramente contextual de la apreciación musical es el hecho de que mucha música parece ambigua, o simplemente opaca, para el no experto: no evoca en absoluto sentimientos o asociaciones definidos. Desde el punto de vista contextual, estaríamos obligados a concluir que esta música carecía de significado para el oyente, pese al hecho de que podría seguir reconociendo algunas de sus características estructurales. Por supuesto, en tales circunstancias uno está siempre expuesto a críticas elitistas de que «es incapaz de apreciar» la música. Se detecta algo de esta actitud, por ejemplo, en los comentarios de Mendelssohn sobre la ambigüedad de la música en su carta a Marc Souchay, escrita en octubre de 1842, en donde afirma que

> *La gente se queja normalmente de que la música es ambigua, de que es muy dudoso lo que deberían pensar cuando la oyen, mientras que todo el mundo entiende las palabras. A mí me pasa exactamente lo contrario... Las ideas que para mí expresa una pieza musical que amo no son demasiado indefinidas para ser puestas en palabras, sino, por el contrario, demasiado definidas... Y por ello encuentro, en cualquier intento por expresar tales ideas, que hay algo correcto, pero al mismo tiempo hay algo insatisfactorio en todas ellas...*

Pero es evidente que ni la apreciación musical, ni ninguna destreza para la interpretación musical, está compartida tan ampliamente, o con el alto nivel de competencia, como lo están las capacidades lingüísticas. En tales circunstancias es difícil creer que las capacidades musicales estén genéticamente programadas en el cerebro de la forma que parecen estarlo

las capacidades lingüísticas. Las variaciones de nuestra capacidad para producir y responder a la música son demasiado grandes para que la capacidad musical sea una adaptación evolutiva esencial. Es más probable que aparezca dicha diversidad si la apreciación musical es un subproducto de capacidades mentales que evolucionaron adaptativamente con otros fines. ¿Podría ser que, a diferencia del lenguaje, la música sea algo de lo que nuestros ancestros podían prescindir?

Para apreciar el espectro de puntos de vista sobre la naturaleza y fuente del significado en la música, deberíamos explicar dos teorías opuestas que constituyen las dos opiniones más extremas. La primera de éstas es una versión formal de las ideas contextuales que acabamos de presentar. Con el título de *referencialismo,* sostiene que el auténtico significado de la música debe encontrarse sólo fuera de la música. No está ni en sus pautas de sonido ni en sus relaciones con alguna realidad estética absoluta; más bien, su significado debe encontrarse solamente en las emociones, ideas y acontecimientos a los que remite. Así, el papel de la música es «remitir» a algo extramusical; su valor es la medida de su éxito al hacerlo. Este punto de vista constituía la teoría oficial de las artes en los antiguos estados marxista-leninistas de la Europa oriental. La música, como las demás artes, tenía una función; la promoción de los objetivos del Estado y la motivación del pueblo para actuar por el bien común de la sociedad. Su valor estaba definido solamente por el grado en que se lograban estos objetivos. Si la emoción que produce la música se deriva solamente de su estructura armónica interna y no muestra referencias externas, entonces es incestuosa y decadente. Podemos ver que esta idea lleva a un rígido control de la actividad artística, pues ahora hay una definición clara de música «mala»: la que da lugar a emociones «erróneas» e inspira las acciones y lealtades «equivocadas». Un defensor extremo de esta idea era el gran novelista ruso León Tolstoi, quien creía que todo debía ser juzgado solamente en términos de su temática no artística. Así, para él, las «mejores» composiciones

musicales eran las marchas, la música popular y las danzas de acompañamiento que generaban sana solidaridad. Las peores, y esto no es sorprendente, incluían buena parte del repertorio clásico. Tenía una opinión especialmente pobre de la Novena Sinfonía de Beethoven, al afirmar que

> *no solo no veo cómo los sentimientos transmitidos por la obra podrían unir a personas tan especialmente entrenadas para someterse a su hipnotismo complejo, sino que soy incapaz de imaginarme a una multitud de personas normales que pudieran entender algo de esta obra larga, confusa y artificial, excepto cortos fragmentos que se pierden en un mar de lo que es incomprensible. Y, por lo tanto, me guste o no, me veo impulsado a concluir que esta obra pertenece a las filas del arte malo… [como lo hace]… casi toda la música de cámara y la ópera de nuestra época, empezando especialmente con Beethoven [Schumann, Berlioz, Liszt, Wagner], por su temática carente de la expresión de sentimientos accesibles a la gente que ha desarrollado una irritación nerviosa e insana provocada por esta música exclusiva, artificial y compleja.*

Esta filosofía presenta la música como un lenguaje cuyos sonidos y símbolos codifican emociones sobre el mundo exterior. Aunque la interpretación que hace Tolstoi de la música es la versión más extrema del referencialismo —al convertirla en una parte de 1 a propaganda del Estado—, versiones más moderadas del mismo son dominantes. Se centran en respuestas emocionales inmediatas a la música antes que en las reacciones sociales mayores. Algunos musicólogos, como Deryck Cooke, han intentado formalizar esta correspondencia identificando intervalos y pautas de notas particulares que invariablemente producen respuestas emocionales específicas. Así, Cooke llegaba a afirmar que la segunda menor induce sentimientos de angustia desalmada en un contexto de finalidad; la alegría

brota al oír la tercera mayor, mientras que el sonido de la tercera menor señala aceptación estoica y tragedia inminente. Desde este punto de vista, la música sería innecesaria si el compositor pudiera transmitir directamente sus sentimientos a la audiencia de alguna otra manera más eficaz. Pero, al convertir emoción en pautas sonoras, el compositor asegura que muchas personas, incluso las que vivan después de él, experimentarán estas mismas emociones. El autor americano Diane Ackerman explica cómo algunos autores utilizan deliberadamente asociaciones contextúales de música para crear una atmósfera particularmente activa:

> *Algunos escritores se obsesionan con canciones country chabacanas y de mal gusto; otros lo hacen con un preludio especial o un poema sinfónico. Creo que la música que eligen crea un marco mental en torno a la esencia del libro. Cada vez que suena la música, recrea el terreno emocional en el que el escritor sabe que vive el libro. Actuando como recurso mnemotécnico, lleva al oyente fetichista a un estado de quietud vigilante idéntico al que probablemente mostraría una exploración cerebral.*

Aunque la visión referencial estricta de la música suena extrema, ella se esconde, suavemente enmascarada, tras la idea ampliamente extendida de que hay un «mensaje» en una pieza musical o que es «bueno» que un niño aprenda a tocar un instrumento musical, porque la música contiene valores no musicales que son beneficiosos o instructivos.

El extremo opuesto al referencialismo es el *absolutismo*. Éste busca el valor y el significado de la música en aquellas cualidades intrínsecas que hacen de ella una creación artística antes que en su contexto. Las pautas sonoras hacen la música significativa: solamente atendiendo a dichos sonidos, y excluyendo todas las alusiones externas, puede descifrarse su puro significado. Para el absolutista, todo lo que realmente importa es lo que para

el referencialista no vale, y viceversa. La versión más extrema de este absolutismo es el *formalismo musical.* Éste ve en la música un significado que no se encuentra en ninguna otra experiencia humana. La música no es una representación de ninguna otra cosa, y su apreciación debería verse como una forma superior de una experiencia intelectual abstracta, no diferente de «El juego de abalorios» de la novela del mismo título de Hermann Hesse, en la que una élite intelectual se esfuerza por producir sinfonías mentales de significado que combinan conceptos musicales, matemáticos e intelectuales en un amplio juego abstracto, cuya forma, aunque nunca completamente revelada al lector, crea una exquisita variedad de ajedrez musical abstracto con su propia estructura narrativa. Presumiblemente no era casual que el maestro de este juego —el Magister Ludis— fuera iniciado en la orden religiosa del Juego de Abalorios por el Maestro de Música, quien adivina el potencial que muestran sus tempranas habilidades musicales.

El formalista no niega que la música tenga motivaciones externas y resonancias con emociones extramusicales; simplemente las encuentra irrelevantes. Esta idea no es privativa de la música. El filósofo Roger Fry la utiliza cuando considera el contenido de la pintura:

> *nadie que tenga una comprensión real del arte de la pintura da ninguna importancia a lo que llamamos el tema de un cuadro —lo que está representado... [porque]... todo depende de cómo está representado y nada depende de qué—. Rembrandt expresaba sus sentimientos más profundos con la misma fuerza cuando pintaba una res muerta colgada en una carnicería que cuando pintaba la Crucifixión o a su mujer.*

En música, la visión formalista de la estética es particularmente atractiva, porque el oyente no está distraído por la maquinaria periférica de la representación o por la elección de un orden exploratorio. La verdadera

apreciación musical no debe ser molestada por emociones y aspiraciones humanas, porque el formalista mantiene que estas emociones no pueden ser representadas por la música. No hay afinidad entre lo que llamamos «belleza» en el mundo natural y la belleza musical. Esta visión gnóstica de la estructura interna de la música conduce a una forma más bien elitista de apreciación musical. La verdadera apreciación musical es el disfrute de las formas estéticas puras inherentes en la música por aquellos oyentes que son sensibles a ellas. La mayoría de los oyentes son incapaces de responder de esta manera, y por ello se satisfacen deteniéndose en las inferiores alusiones contextuales de la música —es decir, en todos los aspectos caros al referencialista—. Cuanto más lejos de la vida y la experiencia humana reside la música, mayor se considera su belleza formal.

Estas dos filosofías extremas de la música parecen insatisfactorias debido a que cada una de ellas excluye por completo lo que ofrece la otra. Una filosofía alternativa, el *expresionismo,* sigue una vía intermedia, sin intentar ser una posición de compromiso. Ve en la música una cualidad estética similar a la que se encuentra en otros aspectos de la experiencia humana. El valor en la música y la experiencia debe encontrarse en la relación entre ellas. De este modo, el expresionista intenta explicar el enigma de cómo una obra musical puede ser significativa como música y como experiencia emocional humana. Las emociones se despiertan cuando una respuesta potencial es impedida o inhibida. Dentro de tradiciones musicales concretas, algunos acordes son siempre seguidos por otros, y los grandes compositores son los que son más hábiles en aumentar las expectativas emocionales, posponiendo y elaborando su resolución. Para oídos occidentales este tipo de desenlace pospuesto se lleva al extremo en la música clásica de la India, donde una disonancia será bordada y elaborada con gran extensión antes de ser finalmente resuelta.

El juego de abalorios. La música de las esferas

> Considero que la música es, por su propia naturaleza, incapaz de expresar nada en absoluto, ya sea un sentimiento, una actitud mental, un estado de ánimo, un fenómeno de la naturaleza... si, como sucede casi siempre, la música parece expresar algo, esto es sólo una ilusión, y no una realidad.
>
> IGOR STRAVINSKY

Los más fervientes sintetizadores del conocimiento fueron los primeros pitagóricos. En el siglo V a. C. fueron de los primeros en contemplar lo que llamaríamos «matemáticas puras»: relaciones matemáticas por sí mismas, más que con un fin práctico. Pero, a pesar de su predilección por la aritmética y la geometría, diferían de los matemáticos modernos en que para ellos la trascendencia de las matemáticas reside en los propios números y formas geométricas, antes que en las relaciones entre los mismos. Pitágoras fue atraído al estudio de la armonía musical porque ésta consagraba relaciones numéricas que podían ser encontradas en cualquier otro lugar del Universo. Parecía que estaban emergiendo conexiones profundas entre partes de la realidad por lo demás inconexas. Su legendario descubrimiento de las simples razones aritméticas entre intervalos armónicos le convenció de que debe haber un íntimo vínculo entre matemáticas y música —que la música era nada menos que el sonido de las matemáticas.

Existe una antigua historia, posiblemente apócrifa, sobre cómo descubrió Pitágoras el vínculo entre número y armonía; Jámblico cuenta que

> *En cierta ocasión [Pitágoras] estaba pensando en la música y razonando consigo mismo si sería posible imaginar alguna ayuda instrumental para el sentido del oído, de modo que lo*

sistematizara, como la vista se hace precisa gracias al compás, la regla y el instrumento del agrimensor, o el tacto es evaluable por el equilibrio y las medidas. Y en esto estaba pensando cuando Pitágoras pasó por la puerta del taller de un herrero, donde oyó los martillos que golpeaban en una pieza de hierro sobre un yunque, produciendo sonidos que armonizaban, excepto uno.

Impresionado por la armoniosa escala de sonidos procedentes de los martillos que golpeaban, Pitágoras entró en el taller del herrero para descubrir cómo este martilleo descuidado podía producir sonidos relacionados armónicamente. Encontró que los intervalos musicales que producían estaban en proporción a los pesos de los martillos. Fue a casa a experimentar más, colgando pesos diferentes de cuerdas de longitudes ajustables y pulsando las cuerdas para producir diferentes sonidos. Descubrió que las secuencias más atractivas de tonos musicales estaban relacionadas por simples razones aritméticas de números enteros a los que él y sus seguidores reverenciaban. Así estaba forjado el vínculo numerológico entre número y música en el taller del herrero.

A Pitágoras se le atribuye el descubrimiento de que las notas en relación armoniosa pueden producirse pulsando cuerdas cuyas longitudes están en razones particulares entre sí. Cuanto más corta es la cuerda, más alta es la nota. Reducir a la mitad la longitud de una cuerda vibrante produce una nota que es una octava más alta; duplicar la longitud produce una nota que es una octava más baja. El oído parece preferir las combinaciones de notas producidas por cuerdas cuyas longitudes están en razones 1:1, 1:2, 2:3 (la «quinta» perfecta), o 3:4. Tomemos una razón como 7:11 y el resultado es notablemente disonante. Pitágoras pudo determinar las razones de las longitudes de cuerdas requeridas para producir combinaciones que fueran agradables al oído. De este modo, la reverencia religiosa de los pitagóricos

hacia los números fue sobrestimulada, y la creencia en que cada número posee un significado oculto quedó fuertemente asociada con el estudio de la armonía musical durante casi dos mil años. La unión pitagórica entre matemáticas y música fue asumida inicialmente por Platón y, junto con la descripción matemática de los movimientos de los cuerpos celestes, se convirtió en la base de una imagen cosmológica en la que las armonías de la música, las matemáticas y el movimiento celeste estaban inextricablemente unidas. Esta línea de pensamiento fue una de las formas más extremas de reduccionismo nunca imaginadas. Puesto que los tonos musicales y los movimientos celestes mostraban relaciones matemáticas, se pensaba que debían ser equivalentes en algún nivel. A partir de esto se argumentaba que cada uno de los cuerpos celestes en movimiento debía producir tonos musicales que dependerían de la distancia del cuerpo a la Tierra y de su velocidad. Además, estos tonos se combinaban para crear una armonía celeste: «La música de las esferas» (Figura 5.2). Aristóteles describe las razones para esta idea en su obra *De Caelo* (El Cielo):

> *el movimiento de cuerpos de ese tamaño [astronómico] debe producir un ruido, porque en nuestra Tierra el movimiento de cuerpos muy inferiores en tamaño y velocidad de movimiento tiene ese efecto. Además, cuando el Sol y la Luna, digamos, y todas las estrellas, tan grandes en número y en tamaño, se están moviendo con un movimiento tan rápido, ¿cómo no iban a producir un sonido inmensamente grande? Partiendo de este argumento, y de la observación de que sus velocidades, medidas por sus distancias, están en la misma razón que las consonancias musicales, ellos afirman que el sonido que produce el movimiento circular de las estrellas está en armonía.*

En los siglos I y II d. C., hubo un serio debate erudito acerca de por qué no podemos oír esta música celeste. Algunos argumentaban que estaba fuera del rango de audición humana, otros que su ubicuidad significaba que no éramos conscientes del mismo y sólo oímos los cambios de sonido con respecto a ello. Otros mantenían que su volumen nos ha hecho sordos al mismo. Ninguna de estas teorías parece haber ganado amplia aceptación.

Esta antigua creencia en un cosmos compuesto de esferas seguía existiendo en tiempos isabelinos. Está muy elocuentemente expuesta por Shakespeare, en *El mercader de Venecia.* Mientras se acerca a la casa de Porcia, Lorenzo describe la armonía celeste a Lancelot; nuestra sordera a ella es una consecuencia de nuestra mortalidad:

¡Cuán dulcemente duerme el claro de Luna sobre este bancal!
Vamos a sentamos allí y dejemos que los acordes de la música
se deslicen en nuestros oídos. La dulce tranquilidad y la noche
convienen a los acentos de la suave armonía.
Siéntate, Jessica. ¡Mira cómo la bóveda del firmamento
está tachonada de patenas de oro resplandeciente!
No hay ni el más pequeño de esos globos que contemplas
que con sus movimiento no produzca una angelical melodía que
concierte con las voces de los querubines
de ojos eternamente jóvenes.
Las almas inmortales tienen en ella una música así;
pero, hasta que cae esta envoltura de barro
que las aprisiona groseramente entre sus muros, no podemos escucharla.

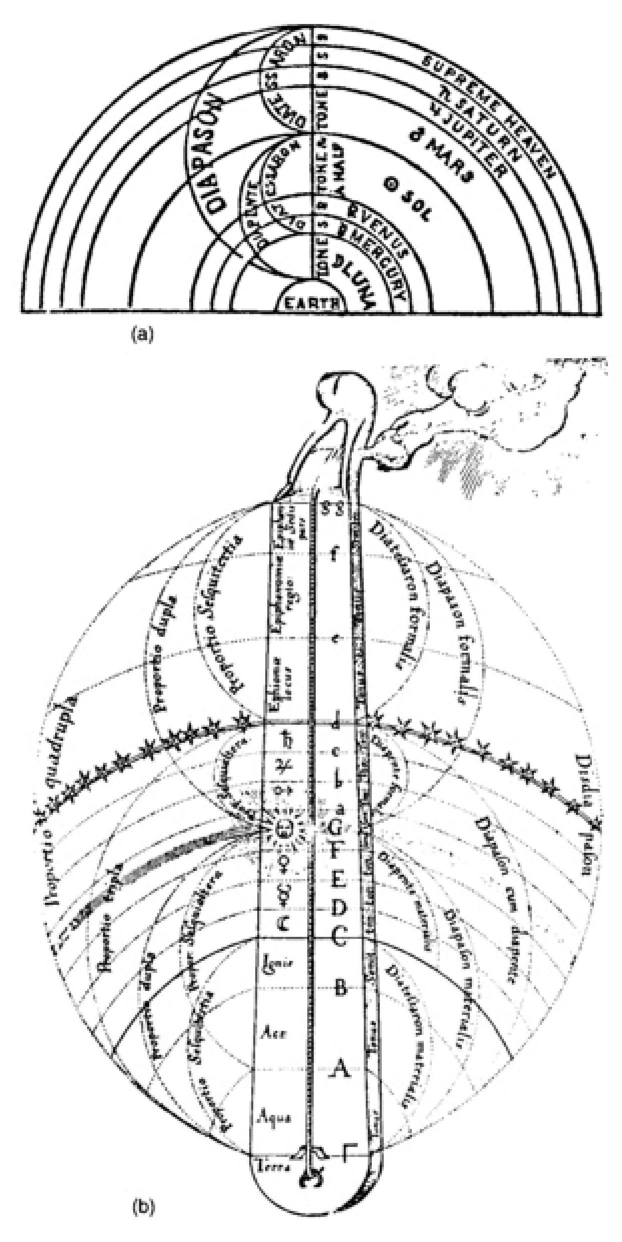


Figura 5.2. (a) Una división pitagórica de la esfera celeste en intervalos musicales, (b) Una elaboración medieval del ideal pitagórico de armonía entre la humanidad y el entorno como se muestra en «The Tuning of the World» de Robert Fludd, de Ultriusque Cosmi Historia.

Hay mucho más que armonía celeste en la teoría musical pitagórica. Además de la música de las esferas celestes *(música mundana)* se distinguían otras dos variedades de música: el sonido de instrumentos, como flautas y arpas *(música instrumentalis),* y la continua música inaudible que emanaba del

cuerpo humano *(música humana),* que surge de una resonancia entre cuerpo y alma. La hipótesis importante que hay tras estas distinciones, que fue asumida por Platón y luego influyó en la filosofía occidental durante largo tiempo, es que la música celeste existe y tiene sus propiedades con total independencia del oyente humano. Para Platón, lo que oímos de la armonía musical es un pálido reflejo de una perfección más profunda en el mundo de los números, que se manifiesta en los movimientos planetarios. Nosotros la apreciamos solamente porque los ritmos de nuestros cuerpos y almas están preformados para resonar con la armonía en el reino celeste. Era esta filosofía trascendental de la música la que Platón reforzó con su creencia más general en que el mundo de las apariencias es una sombra de otro mundo perfecto donde habitan las formas ideales de los objetos que nos rodean. En última instancia, la filosofía platónica es la fuente de la filosofía absolutista de la música que hemos discutido antes.

En el mundo medieval, el estatus de la música se revela por su posición dentro del Quadrivium —el cuádruple currículum— junto con la aritmética, la geometría y la astronomía. Los estudiantes medievales de música se consideraban científicos, y la relación de la música con las matemáticas y la astronomía se consideraba el aspecto más importante de la música. Ellos creían que todas las formas de armonía derivan de una fuente común. Antes de los estudios de Boecio en el siglo VI, la idea de armonía musical no se consideraba independientemente de cuestiones más generales de armonía celeste o ética. Un gran cambio en la visión de la música sólo podía ocurrir en un nuevo clima que rechazara su total reverencia hacia las autoridades del pasado y tratara de dar respuesta a preguntas sobre las cosas examinándolas, y oyéndolas, más que meramente leyendo sobre ellas.

En los primeros tiempos medievales, la interpretación de la música era una actividad mundana y secundaria, irrelevante para su verdadero significado y cualidad. Estamos tan acostumbrados a considerar la música como un arte para interpretar que es difícil apreciar que un fuerte interés por la

interpretación musical no apareció hasta el Renacimiento. Otro aspecto de la interpretación musical que ahora damos por sentado es su mezcla de diferentes melodías; es decir, la *polifonía.* La polifonía —la combinación de dos o más hilos en una textura musical— empezó con el añadido de una o más partes a una melodía llana. El canto en quintas paralelas data del siglo VIII, pero partes vocales independientes no aparecieron hasta el siglo XI. Estos desarrollos proporcionaron la base de lo que con el tiempo iba a convertirse en la elaborada estructura armónica de la música posterior.

El sonido simultáneo de notas diferentes es un fenómeno extraño. Mezclamos colores o texturas y pierden su individualidad; pero los tonos musicales se combinan sin perder sus identidades. Para quienes estaban embarcados en el estudio metafísico de la música esto debe haber parecido un misterio profundo, pero el enorme tiempo que se necesitó para que emergiera la música polifónica sugiere que había una antipatía natural o una barrera ideológica a la misma. Gracias a su desarrollo, la música occidental se apartó de otras tradiciones y evolucionó de forma relativamente rápida hacia estructuras de gran complejidad. Curiosamente, los mil años que necesitó la música para alcanzar el pináculo de la complejidad clásica, de la que tantas personas siguen hoy disfrutando, vieron un desarrollo paralelo de su antigua compañera de cama —las matemáticas— hasta niveles nunca soñados de sofisticación abstracta, que superaban con creces la aplicación práctica contemporánea.

Más tarde, la complejidad creciente de la composición polifónica clásica aportó una dimensión humana al ámbito de la música hasta entonces impersonal y trascendental. En composiciones como las de Beethoven y sus dotados contemporáneos, vemos expresada la personalidad del compositor en su música. Mientras la búsqueda del verdadero significado de la música había mirado en otro tiempo a realidades trascendentales en los cielos para satisfacción final, sus verdades podían ser encontradas ahora por introspección y psicología. La música hablaría de las luchas internas de su

creador o resonaría con las emociones del oyente, amplificando, modificando o pacificándolas de maneras que se veían derivadas de la música y que no aparecían meramente en respuesta a ella. De este modo, los oyentes apasionados pretenden encontrar un significado profundo en la música que trasciende a todas las demás formas artísticas. Tal era la confianza que tenía la humanidad en sus propios logros cuando emergía esta nueva música que, en lugar de degradar su estatus de música de las esferas a musa de la humanidad, su nuevo acento sirvió principalmente para elevar la estimación del hombre por el hombre. Y así, a medida que la sinfonía clásica se hacía más grande y más elaborada en estructura, su centro y su interpretación se hicieron más personales y más estrechamente asociados al carácter de su compositor. Y al volverse desde nociones esotéricas de armonía celeste hacia el significado personal, la popularidad de la música se hizo mucho mayor. Se necesitaron grandes salas de conciertos para acomodar a los oyentes, y la música desempeñó un papel central en la vida pública en toda Europa. Pero con estas instituciones, y los estratos sociales que las frecuentaban, creció un elitismo en la música. Muchas interpretaciones musicales eran exclusivas: era caro asistir a los conciertos y, para apreciar lo que se interpretaba, era necesario poseer una sensibilidad y una apreciación del escenario social de la interpretación musical. Lo que sucedió en el siglo XIX fue una extraña puesta al revés de las cosas. La música ya no era definida o interpretada por su correspondencia con figuras geométricas perfectas, ya estuvieran en el cielo o sobre el papel. Las notas, e incluso los intérpretes, se habían hecho secundarios en el efecto que la música tenía sobre el oyente. Había tenido lugar una revolución anticopernicana que colocaba al alma y el espíritu humanos en el fulcro de la interpretación. Pero esto no duró mucho. Con la llegada de psicólogos como Freud, el estatus de las respuestas humanas a algo tan subjetivo y mezclado con otras respuestas emocionales como la música fue degradado hasta quedar reducido a sólo otra forma de liberación emocional de las tensiones psicológicas.

En los primeros años del siglo XX las posibilidades de la armonía tonal occidental habían sido exploradas al máximo por un conjunto de compositores dotados. Era el momento para una reacción contracultural. Llegó en 1907 con las primeras interpretaciones de obras de Arnold Schoenberg que, en su cromatismo extremo, llevaban el sistema tonal a su límite (si no más allá). Más tarde, en los años veinte, Schoenberg iba a desarrollar el sistema de composición serial utilizando doce tonos al que está asociado su nombre[56].

Surgieron protestas vehementes cuando fueron interpretadas por primera vez. La interpretación de dicha música deliberadamente atonal sirvió para acelerar la percepción de la música contemporánea como una actividad intelectual y oscura, sólo para iniciados. Poco a poco, este énfasis, y el intenso foco sobre la personalidad del artista como factor primario en su obra, ha tenido un fuerte efecto negativo sobre el estatus de la música —un efecto que también puede detectarse en otros lugares en las artes creativas—. Pues, cuando la personalidad lo es todo, cualquier período durante el que faltan personalidades excéntricas o poderosas puede ser interpretado como una era de debilidad en la propia forma artística. La música clásica ya no desempeña un papel central en nuestra cultura. No es noticia de cabecera en ningún sentido. Está demasiado divorciada del centro de gravedad de las cosas. La más novedosa de las artes —la música popular— desempeña un papel central en la cultura de los jóvenes, pero podría argumentarse que, en una medida considerable, ha alcanzado también dicha posición por razones que tienen poco que ver con su contenido musical. Una vez más, el foco se ha centrado principalmente en los intérpretes como personalidades, o figuras de culto, antes que como músicos. Su música ha servido como una llamada de alistamiento para

---

[56] En una curiosa deferencia hacia la superstición numerológica, de la que el propio Pitágoras se hubiera sentido orgulloso, Schoenberg utilizó la palabra «Aron» en lugar de «Aaron» en el título de una de sus óperas, *Moses und Aron* para que tuviera doce letras en lugar de trece. Es una ironía que él muriera el viernes 13 de julio de 1931.

movimientos contraculturales que reaccionan contra las normas de comportamiento establecidas en general, y no simplemente contra sus gustos musicales. Sin embargo, la era moderna ha visto la emergencia de un nuevo fenómeno musical: el del oyente solitario. Con la disponibilidad de música en la radio y en el gramófono se hizo posible ser un oyente privado. Esto ha contrarrestado el elitismo del siglo XIX, y ha promovido el estudio y el análisis de la música por razones distintas del entretenimiento. También ha permitido una diversidad mucho mayor en el desarrollo del estilo musical. Formas inusuales de música, de interés sólo minoritario, pueden interpretarse y oírse sin el coste de alquilar enormes salas de conciertos en donde celebrar interpretaciones públicas. Resulta irónico, no obstante, que muchas obras del *pop* moderno causan profunda insatisfacción cuando se interpretan en vivo, debido a su enorme dependencia del sonido sintetizado y con múltiples pistas que la producción en estudio proporciona fácilmente pero que los intérpretes en directo no siempre consiguen.

El pianista. Oyendo por números

La música y la ciencia estuvieron [en un tiempo]… tan profundamente identificados que cualquiera que sugiriera que había una diferencia esencial entre ellas habría sido considerado un ignorante [pero ahora]… alguien que proponga que tienen algo en común corre el riesgo de ser etiquetado de hipócrita por un grupo y de diletante por el otro, y, lo peor de todo, como un populista por ambos.

JAMIE JAMES

Desde hace tiempo ha existido la sospecha de que hay una conexión profunda entre matemáticas y música. Pitágoras la destapó, y una vez que este genio hubo salido de la botella fue terriblemente difícil volverlo a meter. Miles de años más tarde, la profunda estructura en la música de Bach inspiró a Leibniz a afirmar que «la música es el ejercicio aritmético oculto de un alma inconsciente que está calculando». El origen y desarrollo de esta idea ha modelado las actitudes hacia la música durante los últimos dos mil años, y sólo en los últimos trescientos años ha sido descartado como paradigma central. Examinando la música hoy, hay una similitud superficial entre matemáticas y música porque ambas hacen uso de notaciones simbólicas (Figura 5.3).

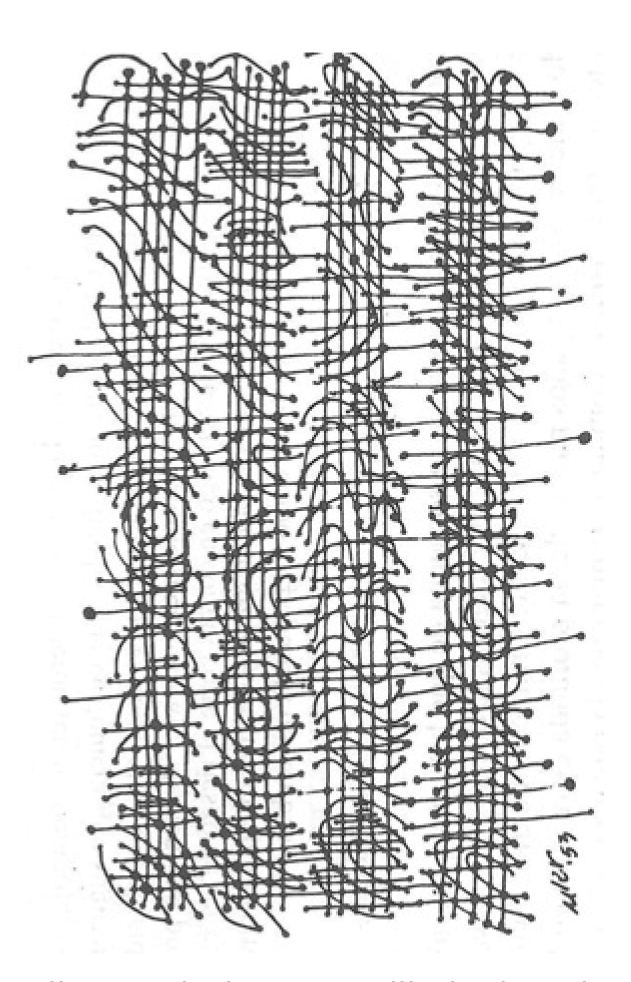


Figura 5.3. Alien Musical Scores; dibujo de Robert Mueller.

Pero hay muchas diferencias: las matemáticas tienen una inevitabilidad lógica de la que carece la música; más clara aún es la división entre la habilidad para hacer música, ya sea componiendo o interpretando, y el placer que da escucharla. No hay división similar en las matemáticas. No son éstas un deporte de espectadores: sólo los practicantes de la lógica matemática disfrutan leyendo u oyendo hablar de ella. Además, las demostraciones matemáticas dan una imagen algo confusa de lo que los matemáticos hacen realmente y de cómo piensan. Hay una divisoria real entre la obra creativa de los matemáticos y la presentación formal de sus resultados. Las diferentes reacciones de una «audiencia» a las matemáticas, en contraposición a la música, ilustran la capacidad de la música para despertar grandes emociones y acciones, una capacidad de la que carecen por completo las matemáticas. Esto sugiere que la música está más ligada a respuestas instintivas y primitivas al mundo que lo está el recuento.

El perfil multicultural de la interpretación y apreciación musical es una característica sorprendente de las civilizaciones humanas en todo el mundo. Esta universalidad es compartida por una propensión humana hacia el lenguaje y hacia el recuento. Aunque hay similitudes superficiales entre estas capacidades humanas, nos impresionan más por sus diferencias. Los tonos musicales suenan ciertamente diferente de las palabras, y el procesamiento de tonos musicales por el cerebro difiere del procesamiento del lenguaje. Nuestra recepción de los tonos queda interferida al introducir más tonos, pero no al añadir información verbal en forma de palabras o números. Estas disparidades se manifiestan en un nivel neurológico por lo que sabemos de la geografía del cerebro. En individuos diestros, las capacidades lingüísticas están controladas casi enteramente por el hemisferio izquierdo del cerebro, mientras que las sensibilidades musicales están gobernadas básicamente por el hemisferio derecho. En consecuencia, lesiones graves en el lado izquierdo del cerebro son generalmente catastróficas para el habla, pero no perturban

las capacidades musicales. Recíprocamente, lesiones en los lóbulos central y temporal del hemisferio derecho, o una enfermedad de este lado del cerebro, son desastrosas para el disfrute de la música: reduce nuestra capacidad para discriminar sonidos y nuestra apreciación de matices en el tono. Esta asimetría entre los dos hemisferios se manifiesta también en nuestra audición; el sonido recibido por el oído derecho es procesado en el hemisferio izquierdo, y el del oído izquierdo es procesado en el hemisferio derecho. Por ello, tendemos a procesar el lenguaje más efectivamente cuando es oído con el oído izquierdo, y los sonidos musicales que entran en el oído derecho se recuerdan mejor que los que entran por el oído izquierdo. Sin embargo, cuando se hacen tests similares con sujetos con buena formación musical, estas diferencias se reducen considerablemente. Presumiblemente, la formación musical aumenta la capacidad de análisis de la estructura musical por medios cuya eficacia reside dentro del hemisferio izquierdo del cerebro. Esto no es enteramente sorprendente. Sería de esperar que alguien educado en los aspectos matemáticos de la estructura musical activara algunas de las redes de procesamiento matemático dentro del cerebro cuando oye música. En general, si existe una asociación contextual con un elemento de matemáticas o de música, su contemplación debería despertar los procesos mentales específicos del lenguaje que tratan con él.

A pesar de estas tendencias neurológicas, hay muchas peculiaridades y excepciones que reflejan la diversidad de la capacidad musical humana. Aspectos de la capacidad musical que están fuertemente ligados a habilidades interpretativas sufren si hay lesiones en las partes del cerebro que gobiernan las habilidades motoras asociadas. Además, aparte de nuestras propias interpretaciones instrumentales, la música se dirige a nosotros desde una variedad de fuentes —vocalistas, grupos de *rock,* orquestas, pájaros, grabaciones y también como fondo de películas y de danza—. Es probable que la asociación entre música y el «algo más» que va con ella, especialmente en situaciones donde dicha asociación amplifica las

emociones, produzca respuestas mentales muy complicadas. Por el contrario, nuestra exposición al sonido del lenguaje es relativamente uniforme —incluso las grabaciones de conversaciones suenan igual que las voces en directo— y la exposición de la persona media a las matemáticas es aún menos estimulante. Esta uniformidad hace de la capacidad lingüística una capacidad mental mucho más centrada que la apreciación musical.

Si examinamos nuestra capacidad para contar y calcular desde una perspectiva neurológica, encontramos que hay individuos que pierden sus capacidades lingüísticas a causa de una lesión cerebral, pero pueden seguir contando. Algo del circuito mental clave para los cálculos parece estar presente en el hemisferio derecho del cerebro, aunque muchos de los aspectos cuasi lingüísticos de la lectura y descripción de símbolos matemáticos son tratados, como el lenguaje, por el lado izquierdo del cerebro. Algunas áreas del lado izquierdo del cerebro, que desempeñan un papel importante en la orientación espacial, también pueden ser importantes para el sentido de los números y el tipo de intuición geométrica que valoran los matemáticos. Aunque nuestra simple capacidad para contar puede tener sus orígenes en el hemisferio derecho, el razonamiento matemático abstracto parece residir en el hemisferio izquierdo. Esto deja el hemisferio derecho para controlar las operaciones más sintéticas y holísticas, especialmente las que implican imágenes y descripción metafórica, junto con el procesamiento de la música.

Las relaciones entre música, pauta y lenguaje nos invitan a proponer algunos posibles escenarios para su desarrollo histórico. Seis opciones claras se sugieren de forma natural. En la primera, existe una forma de función mental ancestral, común entre los precursores de la humanidad, que se separa en hilos independientes —uno de música, el otro de lenguaje— aunque retienen algunas trazas residuales del vínculo entre ambos que se manifiesta en actividades como el canto. En el segundo escenario posible, se supone que la música es primaria y el lenguaje se desarrolla a partir de ella,

quizá estimulado por la evolución fisiológica o neurológica. En la tercera opción, el lenguaje es primario, y la música evoluciona posteriormente a partir de él como una actividad independiente —por ejemplo, debido al desarrollo del canto como un medio de transmitir sonidos a largas distancias—. Cuarta: el lenguaje podría ser un hilo conductor de la actividad y la cultura humana que se desarrolla en paralelo con una función más básica para el reconocimiento de patrones. Inicialmente, el reconocimiento de patrones espaciales se transforma en subproductos bien desarrollados, como el arte y la creación de imágenes; luego se agudiza el reconocimiento de pautas temporales y se diversifica en el ritmo musical. En este escenario, la música se desarrolla después de otras prácticas artísticas. Quinta: podría haber una función primaria para el reconocimiento de pautas, de la que se separa la construcción del lenguaje. Posteriormente se desarrolla el reconocimiento de pautas temporales y genera otro retoño cultural en la música: mientras que el hilo del reconocimiento de patrones espaciales da lugar al arte como una manifestación cultural. Sexta: una capacidad de reconocimiento de patrones primaria podría haberse diversificado gradualmente en una secuencia de capacidades más especializadas: primero, reconocimiento de patrones espaciales, luego de secuencias temporales, y luego de lenguaje y secuencias numéricas.

Actualmente, la mayoría de los lingüistas parecen creer que el lenguaje es una capacidad humana específica, en lugar de ser meramente otro subproducto de las capacidades cerebrales de aprendizaje y reconocimiento de patrones generales. Puede reunirse un impresionante conjunto de pruebas en apoyo de rasgos compartidos por lenguajes humanos dispares, que son testimonio de una «gramática» universal que está cableada en la estructura del cerebro. Esto da sentido a la observación de que los niños no parecen aprender realmente el lenguaje en una medida que sea conmensurable con su capacidad de utilizarlo. Como describimos en el Capítulo 2, las capacidades lingüísticas parecen estar preprogramadas para

activarse en momentos concretos durante el desarrollo temprano. El lenguaje se ve así como un instinto natural antes que como un comportamiento aprendido: es básicamente un producto de la Naturaleza antes que de la educación. Podríamos preguntar si podría decirse lo mismo de la capacidad matemática o la musical. Esta idea es mucho más difícil de sostener. La capacidad musical no está compartida al mismo nivel de competencia, o con la misma ubicuidad, que la capacidad lingüística. Una de las cosas más sorprendentes de la capacidad lingüística es su sofisticación y uniformidad si se la compara con todas las demás habilidades. Hay montones de individuos sanos que no pueden sumar o que apenas se preocupan por cualquier tipo de música, pero ninguno que no pueda hablar un lenguaje. Si se examinan las lenguas de los pueblos tradicionales, que con frecuencia no tienen sistemas matemáticos más allá de contar hasta dos, cinco o diez, su lengua es similar en el fondo a la nuestra, y en absoluto primitiva cuando se compara con el vocabulario requerido por sus estilos de vida. Un estudio de los orígenes del recuento en pueblos antiguos revela un patrón común de sistemas de recuento sencillos. Se podría argumentar que los sistemas de palabras numerales que emplean tienen un carácter principalmente lingüístico, antes que «matemático». Para introducirse en las matemáticas difíciles y profundas —y no sólo utilizar símbolos como abreviaturas de palabras que describen cantidades— se requieren sofisticados conceptos notacionales, y éstos sólo han sido introducidos por unas pocas culturas avanzadas. Uno de estos pasos cruciales es la invención de una notación «posicional» para representar los números, en la cual la posición relativa de un símbolo transmite información sobre la cantidad que representa. Así, para nosotros, la expresión «341» significa tres centenas más cuatro decenas más una unidad. Esta poderosa idea, junto con la idea de un símbolo, «0», que ello requiere, fue concebida sólo por tres culturas avanzadas: los sumerios y babilonios, los mayas y los indios. Nuestra propensión a esta notación posicional puede estar ligada a la programación sintáctica que poseen

nuestras mentes para el lenguaje natural. Por desgracia, todavía no se ha hecho ningún estudio detallado de los vínculos entre rasgos lingüísticos en las culturas tradicionales y la estructura de sus sistemas de recuento. Hasta que no se haga un estudio cuidadoso de esta relación entre el uso lingüístico de los términos numerales, es difícil determinar si la propensión humana hacia el recuento es realmente independiente de la propensión hacia el lenguaje en las culturas antiguas.

Si comparamos la música con las matemáticas, es evidente que la música muestra una mayor diversidad cultural. Esto no es sorprendente si consideramos la música como una invención y elaboración humana, porque las matemáticas parecen ofrecer más que eso. La música no nos ayuda a entender el funcionamiento del mundo físico; las matemáticas sí lo hacen. Las matemáticas exhiben una multitud de características que apuntan a que algo de nuestro conocimiento matemático es fruto del descubrimiento, y no meramente un subproducto de capacidades desarrolladas con otros fines. Las matemáticas nos afectan de formas completamente diferentes que el lenguaje o la música. El lenguaje es totalmente flexible; puede afectamos emocional o lógicamente. La música influye principalmente en nuestras emociones, de una manera que las matemáticas no pueden hacer. Pese a todo, cada una de estas tres actividades está ligada de algún modo a los límites de nuestra fisiología. El lenguaje humano sofisticado fue posible solamente gracias a la evolución de la estructura especial de la laringe humana que otros mamíferos no poseen. Sin este desarrollo puramente anatómico, ninguna programación neural especial para la capacidad lingüística nos hubiera servido de nada. En el caso de las matemáticas, podemos ver cómo nuestros diez dedos de las manos (y en algunos casos, también nuestros diez dedos de los pies) determinaron la forma de muchos de los sistemas de recuento que se desarrollaron primero. Sin embargo, el sistema decimal (de base 10) que hemos adoptado no es el óptimo para todos los objetivos —como muestra el uso de la aritmética binaria en los

lenguajes de computador—. Las matemáticas podrían haberse desarrollado muy satisfactoriamente si el sistema de recuento se hubiera escogido de forma diferente (digamos en base 12) en las más influyentes culturas indoeuropeas. Del mismo modo, veremos que la música atractiva está significativamente limitada en rango, y forma, por la sensibilidad del oído y por la capacidad de análisis de frecuencias del cerebro. Si quisiéramos hacemos comprender por extraterrestres, podríamos confiar en utilizar matemáticas. Para basarnos en nuestros lenguajes tendría que darse el caso de que nuestra gramática básica, que opera en el nivel neurológico en el *software* de procesamiento de lenguaje de nuestro cerebro, fuera el único programa capaz de realizar tales trucos lingüísticos. En el caso poco probable de que fuera así, los extraterrestres inteligentes compartirían la estructura raíz de las gramáticas mentales humanas. Incluso así, tendríamos que hacer una enorme cantidad de análisis y decodificación para desvelar un mensaje en su lengua; mientras que una descripción de un sistema físico compartido —como un átomo o un rayo de luz— permitiría eliminar mucho más fácilmente las diferencias superficiales en el simbolismo matemático. Por el contrario, es muy probable que la música no nos ayudara a entender al otro o a comunicar directamente. Más bien, revelaría cosas importantes sobre la naturaleza y fisiología de sus generadores y apreciadores. Es razonable especular que los extraterrestres poseerían subproductos «artísticos» de sus adaptaciones evolutivas, pero no hay ninguna razón por la que debieran estar principalmente asociados con señales sonoras antes que con señales luminosas, funciones motoras o incluso papilas gustativas. La música que conocemos es un subproducto humano muy especializado, que es apreciado a causa de las adaptaciones especiales del cerebro a otros aspectos del mundo y a la necesidad de predecir y anticipar los cambios que pueden ocurrir en nuestro entorno. Mientras que la capacidad lingüística parece ser una consecuencia necesaria de nuestra humanidad, la música no parece mostrar la misma inevitabilidad o sofisticación, y la capacidad matemática no

parece ser necesaria ni evidente en ningún grado importante en la mayoría de los humanos.

Podríamos estar tentados a pensar que si la música agradable pudiera reducirse a pautas matemáticas de una variedad definida, entonces el enigma de lo que «es» la música estaría de algún modo resuelto. Por desgracia, las cosas nunca son tan simples, pues es un secreto bien guardado de los matemáticos que ni siquiera ellos saben lo que son las matemáticas. Cuatro filosofías de las matemáticas son corrientes entre los matemáticos, los filósofos y los usuarios de las matemáticas. He argumentado en otro lugar[57] que la notable aplicabilidad de las matemáticas a la estructura del mundo físico, y a las leyes que lo gobiernan, debería tomarse como el dato más importante al decidir entre ellas. Para apreciar la profundidad de la laguna entre matemáticas y música, pese a sus similitudes superficiales y tradiciones antiguas, tenemos que examinar con más detalle la extraordinaria utilidad de las matemáticas y cómo se interpreta.

Los científicos creen tan profundamente en la estructura matemática de la Naturaleza que han convertido en un incuestionable artículo de fe que las matemáticas son necesarias y suficientes para describir cualquier cosa, desde el espacio interior de las partículas elementales al espacio exterior de las estrellas y galaxias lejanas —incluso el propio Universo—. Pese a todo, ¿por qué el lenguaje simbólico de las matemáticas tiene algo que ver con manzanas que caen, átomos que se dividen, estrellas que explotan o mercados de valores que fluctúan? ¿Por qué la realidad marcha a un ritmo matemático? Las respuestas dependen crucialmente de lo que pensamos que son las matemáticas.

A comienzos del siglo XX, los matemáticos se enfrentaban a algunos problemas que minaban su confianza. Bertrand Russell propuso paradojas

---

[57] *Véase John Barrow,* La trama oculta del Universo.

lógicas, como la del barbero[58], que amenazaban con minar todo el edificio de la lógica y las matemáticas. Pues ¿quién podía prever dónde podría salir a la superficie la siguiente paradoja? Frente a tales dilemas, David Hilbert, el matemático más destacado de la época, propuso que deberíamos dejar de preocuparnos por el significado de las matemáticas. En su lugar, simplemente deberíamos definir que las matemáticas son nada más, y nada menos, que el conjunto de fórmulas que pueden deducirse a partir de un conjunto de axiomas iniciales consistentes manipulando los símbolos implicados de acuerdo con reglas especificadas. Creía que este procedimiento no podía crear paradojas si era ejecutado con precisión. El vasto bordado de conexiones lógicas que resultaba de la manipulación de todos los grupos de axiomas de partida compatibles, de acuerdo con todos los conjuntos de reglas posibles, es todo lo que «son» las matemáticas. Este punto de vista se denomina *formalismo matemático.* Como el formalismo musical, desecha cualquier búsqueda del significado de una pauta de símbolos en un contexto que es externo a su representación. El formalista no ofrecería una explicación para el carácter matemático de la física como no lo haría el formalista musical para tratar de explicar por qué Wagner puede ser deprimente.

Hilbert pensaba que, por definición, esta estrategia libraría las matemáticas de todos sus problemas. Dado cualquier enunciado matemático, podíamos determinar si era una deducción válida a partir de un conjunto consistente de hipótesis de partida desarrollando la secuencia de conexiones lógicas. Hilbert y sus discípulos se pusieron a la obra, confiados en que podían recoger todas las matemáticas conocidas con sus reglas y axiomas, dejando fuera de la valla a las quimeras paradójicas de Russell. Por desgracia, y de forma totalmente inesperada, su empresa colapso repentinamente. En 1931, Kurt Gödel, entonces un joven matemático desconocido de la Universidad de

[58] Un barbero afeita a los que no se afeitan a sí mismos. ¿Quién afeita al barbero?

Viena, demostró que el objetivo de Hilbert es inalcanzable en cualquier sistema matemático suficientemente grande para incluir la aritmética ordinaria. Cualquiera que sea el conjunto de axiomas de partida que uno escoja, cualquiera que sea el conjunto de reglas consistentes que adopte para manipular los símbolos matemáticos implicados, siempre debe existir algún enunciado, formulado en el lenguaje de dichos símbolos, cuya verdad o falsedad no puede decidirse utilizando dichos axiomas y reglas. Peor aún, no hay manera de decir nunca si los axiomas de partida son lógicamente consistentes o no. Sorprendentemente, la verdad matemática es algo más grande que axiomas y reglas. Tratemos de resolver el problema añadiendo una nueva regla, o un nuevo axioma, y simplemente creamos nuevos enunciados indecidibles. Si queremos comprender la verdad lógica tenemos que aventuramos fuera de las matemáticas. Si se define una «religión» como un sistema de ideas que contiene enunciados indemostrables, entonces Gödel nos demostró que las matemáticas no son solamente una religión: son la única religión que puede automostrarse como tal.

Un pariente mucho más interesante del formalismo es el *estructuralismo.* Éste es la filosofía de las matemáticas que las ve como el conjunto de todas las estructuras o pautas posibles. Algunas de estas pautas están ejemplificadas en los objetos físicos, como nubes, diseños de papel de pared o las formas de las galaxias; otras lo están en secuencias de operaciones, y otras más están presentes en operaciones mentales o propiedades de aquellas cantidades que llamamos números. Esta visión de las matemáticas corre el riesgo de ser demasiado amplia porque incluye como matemáticas todas las actividades generadoras de pautas —marcar líneas en una autopista, peinar, pintar o la línea de montaje en una fábrica de coches— que no todos los matemáticos podrían considerar como matemáticas. Pero es un pequeño precio a pagar por una imagen de las matemáticas que suena verdadera y proporciona una respuesta simple al misterio de por qué las matemáticas funcionan tan bien para describir el mundo. Para que exista

cualquier ser pensante en el Universo tendría que haber existido algún orden en alguna parte del mismo. Lo que llamamos matemáticas es tan sólo el estudio de ese orden y las pautas que somos capaces de generar a partir de él. El misterio de la efectividad de las matemáticas cambia ligeramente de foco: el misterio real no es ahora que las matemáticas funcionen, sino que tales matemáticas simples sean tan poderosas y de tan gran alcance que puedan decirnos algo sobre el mundo. El estructuralismo es atractivamente simple. Es una manera útil de transmitir de qué tratan las matemáticas a los no matemáticos. Pero si tratamos de aplicarlas a otros temas más especializados, entonces su cualidad omniincluyente se convierte en un problema más grande. Como filosofía de la música, terminaría definiendo la música como una colección de todas las pautas hechas con sonidos. Incluiría explosiones, ruidos de cubertería cayendo al suelo y también el habla humana. La música moderna y experimental sería bienvenida en este marco inclusivo, pero la debilidad de la definición es evidente. ¿Qué no es música?

Una imagen menos inflexible de las matemáticas es una que se centra en el hecho de que es una actividad humana sin fin. El *invencionismo* es la creencia de que las matemáticas no son otra cosa que lo que los matemáticos hacen. Las entidades matemáticas, como los conjuntos o los triángulos, no existirían si no hubiera matemáticos. Inventamos las matemáticas; no las descubrimos. El invencionista no está impresionado por la utilidad de las matemáticas, pues argumenta que las propiedades bien adaptadas a la descripción matemática son las únicas que hemos sido capaces de descubrir. Esta visión de las matemáticas es común entre «consumidores» de matemáticas, particularmente científicos sociales y economistas, debido a su preocupación por las construcciones sociales artificiales y su estudio de problemas que son tan complicados que se necesitan muchas aproximaciones e idealizaciones para hacerlos tratables.

El descubrimiento independiente de los mismos teoremas matemáticos por diferentes matemáticos con orígenes económicos, culturales y políticos

completamente diferentes —a veces en épocas ampliamente separadas de la historia— es un argumento contra semejante visión simplista. El invencionista podría responder señalando la universalidad de las lenguas humanas. Pese a sus diferencias superficiales, hay fuerte evidencia de que comparten una estructura subyacente común. Esta «gramática universal» significa que un extraterrestre lingüísticamente sofisticado que visitara el planeta Tierra tendría base para concluir que los seres humanos hablan una misma lengua, aunque con muchos matices regionales. Por consiguiente, cabría esperar que aquellos aspectos de esta gramática universal que comparten características de la simple lógica, y con ello del recuento, harían que también el recuento parezca instintivo. De hecho, aunque el simple recuento —a veces sobre bases diferentes de diez— es casi universal en culturas antiguas y primitivas, prácticamente ninguna de ellas llegó a realizar operaciones matemáticas más sofisticadas que contar. Esto sugiere que estas operaciones matemáticas superiores no están genéticamente programadas en el cerebro humano —¿y qué razón evolutiva podría haber para prodigar recursos valiosos en semejante lujo?—. Es más probable que sean subproductos de capacidades de reconocimiento de patrones multipropósito. Pero el simple recuento, puesto que está tan íntimamente ligado a las operaciones lingüísticas y a la lógica de la propia programación del cerebro para el lenguaje, está efectivamente programado.

Otra objeción a la visión invencionista de las matemáticas emerge al contemplar el origen evolutivo de nuestra mente. Incluso si las matemáticas, en cierto sentido, salen de nuestra mente, o son impresas en ellas por sensaciones de los fenómenos naturales de los que somos testigos, ¿cuál es la fuente de esa estructura matemática? Nuestra mente no puede crearlas de la nada. Más bien, la estructura matemática del mundo está instalada en la mente humana por un proceso evolutivo que recompensa con supervivencia las representaciones fieles de la realidad, y elimina imágenes equivocadas de

la realidad porque tienen poco valor de supervivencia. Cuando se sigue hasta su fuente, el invencionismo se seca.

Una interesante variante moderna del invencionismo es el *constructivismo social*, que ve las matemáticas como algo que ha surgido de nuestras interacciones sociales colectivas. A este respecto es como una constitución nacional, un código legal o un sistema monetario. Estas cosas son reales pero no son ni físicas ni mentales. Surgen a partir de la interacción social y cultural de muchos individuos. No residen solamente o completamente en la mente de un solo individuo, y sin las personas que dieron lugar a ellos estos constructos sociales no existirían. Esta aproximación a las matemáticas apela al fenómeno de la emergencia, que se ha convertido en una aproximación de moda para explicar la complejidad. Ve las matemáticas como una actividad social complicada que ha surgido de actividades mentales y físicas más sencillas y bien definidas, y ha conseguido un grado de consenso sorprendentemente alto entre sus participantes. Esta visión no ayuda especialmente cuando se trata de entender por qué las matemáticas trabajan tan bien como descripción del mundo o por qué las matemáticas abstractas resultan ser tan a menudo útiles en la práctica. Sus defensores argumentarían que agranda el contexto en el que puede buscarse una solución a estos problemas. Si aplicamos esta aproximación a la música encaja bastante mejor. La música puede verse como un fenómeno emergente que tiene raíces locales que forman estilo y pauta. Se desarrolla en el tiempo. Implica la formación de una opinión colectiva. Pero ninguna de estas características es privativa de la música. Como en el caso del estructuralismo, hemos tropezado con el problema de una definición omniincluyente.

La tercera opción es el platonismo. Para el platonista matemático, el mundo es matemático en un sentido profundo. Los conceptos matemáticos existen y son descubiertos por los matemáticos, no inventados por ellos. «Pi» está

realmente en el cielo[59]. Las matemáticas existirían en ausencia de matemáticos y podrían utilizarse para comunicarse con seres extraterrestres que se hubieran desarrollado independientemente de nosotros. Es interesante que esta visión parece estar asumida implícitamente por todos los practicantes actuales de la «Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre» (SETI), que emiten al espacio información que está basada en la universalidad de los conceptos subyacentes a la ciencia y las matemáticas humanas.

Mientras que el formalismo y el invencionismo se llevan mal con la irrazonable efectividad de las matemáticas como descripción de la Naturaleza, el platonista hace de ello la piedra angular de su argumento. La mayoría de los científicos y los matemáticos realizan su trabajo cotidiano como si el realismo platónico fuera verdadero, incluso si les resultara difícil defenderlo con fuerza cuando se les hiciera reflexionar durante el fin de semana. Pero el platonismo matemático tiene sus dificultades. Está impregnado de vaguedad. ¿Dónde está ese otro mundo de objetos matemáticos que descubrimos? ¿Cómo entramos en contacto con él? Si las entidades matemáticas existen realmente más allá del mundo físico de los particulares que experimentamos, entonces parecería que sólo podemos entrar en contacto con ellas por algún tipo de experiencia mística que es más afín a la videncia que a la ciencia. Esto significa que no podemos tratar la adquisición del conocimiento matemático de la misma manera que tratamos otras formas de conocimiento sobre el mundo físico: Tratamos el último como conocimiento significativo porque los objetos de los que tenemos conocimiento pueden interaccionar con nosotros de una manera influyente, mientras que no parece haber ningún medio por el que las entidades matemáticas puedan afectamos o ser influidas por nosotros.

---

[59] Se trata de un juego de palabras con la expresión inglesa «a pie in the sky» (literalmente, un pastel en el cielo) que corresponde aproximadamente a la española «un castillo en el aire». *(N. del t).*

La última respuesta al fermento de incertidumbre sobre las paradojas lógicas que plagaron el formalismo durante los primeros años del siglo XX fue el *constructivismo*. Era una versión matemática de la doctrina del operacionalismo. Su punto de partida, de acuerdo con Leopold Kronecker, uno de sus creadores, era el reconocimiento de que «Dios creó los enteros; todo lo demás es cosa del hombre». Lo que él quería decir con esto era que sólo deberíamos aceptar las nociones matemáticas más simples —la de números-enteros 1, 2, 3, 4... y la operación de recuento— como punto de partida, y luego derivar paso a paso todo lo demás a partir de estas nociones intuitivamente obvias. Adoptando esta postura conservadora, los constructivistas querían evitar la manipulación de entidades contraintuitivas de las que no podíamos tener ninguna experiencia concreta. Como resultado, el constructivismo llego a ser conocido como *intuicionismo,* para resaltar su apelación autoenunciada a los cimientos de la intuición humana.

Para el constructivista, las matemáticas son el conjunto de deducciones que pueden construirse en un número finito de pasos deductivos a partir de los números naturales. El «significado» de una fórmula matemática es simplemente la cadena finita de computaciones que se han utilizado para construirla. Esta idea puede sonar bastante inocua, pero tiene consecuencias catastróficas. Crea una nueva categoría de enunciados matemáticos, pues el estatus de cualquier enunciado puede ser ahora triple: verdadero, falso o *indecidido.* Un enunciado cuya verdad no puede decidirse en un número *finito* de pasos constructivos permanece en el limbo del tercer estatus. Los matemáticos preconstructivistas, que se remontan a Euclides, habían establecido métodos de probar la verdad o falsedad de fórmulas que no consistían en un número finito de pasos deductivos. Un método famoso muy querido por los antiguos griegos era la *reductio ad absurdum.* Para demostrar que algo es verdadero, suponemos que es falso, y de esta suposición deducimos algo contradictorio (como 2 = 1). De esto concluimos que nuestra suposición original debía ser falsa. Este argumento se basa en la

presuposición de que un enunciado es o verdadero o falso. Pero, para el constructivista, un enunciado sólo se prueba cierto después de una demostración explícita en un número finito de pasos deductivos.

Si examinamos detenidamente el constructivismo, parece una doctrina realmente peculiar. Es más parecido a una filosofía de un juego deductivo como el ajedrez que a una filosofía de las matemáticas. Para que funcione, debe eliminar del arsenal del matemático formas bien establecidas de argumento lógico. Define las matemáticas de un modo antropocéntrico: como la totalidad de todas las deducciones paso a paso finitas a partir del cimiento de la intuición humana, los números naturales. No hay existencia matemática antes de que tenga lugar este proceso de construcción. Aparte de su postura anticopernicana, la noción de que existe una «intuición» humana universal para los números naturales no tiene un soporte histórico. El constructivista nunca puede decir si mi intuición es la misma que la suya, o si la intuición humana ha evolucionado en el pasado o evolucionará más en el futuro. La matemática que crea a partir de la intuición humana es un fenómeno dependiente del tiempo que depende del matemático involucrado en su construcción. Las matemáticas constructivistas están cerca de ser una rama de la psicología. Plantean muchos problemas. ¿Por qué deberíamos partir de los números naturales? ¿Qué cuenta como un posible paso constructivo? ¿Por qué algunas construcciones son más útiles y aplicables al mundo real que otras? ¿Por qué no podemos tener intuiciones de conjuntos infinitos? ¿Cómo se explica la utilidad de conceptos no constructivos en el estudio del mundo físico? Éstas son preguntas preocupantes. Después de todo, también aparecen conjuntos infinitos en la intuición humana.

Pero el constructivismo tiene algo que enseñamos sobre el carácter matemático de la Naturaleza. Gödel nos enseñó que siempre debe haber algunos enunciados de la aritmética cuya verdad nunca puede ser probada o refutada, pero ¿qué pasa con todos esos enunciados cuya verdad podemos decidir mediante los métodos tradicionales de las matemáticas? ¿Cuántos de

ellos pueden demostrar los constructivistas? ¿Podemos construir, al menos en teoría, un computador que lea datos de entrada, muestre el estado actual de la máquina, determine un nuevo estado a partir del presente, y utilizar entonces el computador para decidir si un enunciado dado es verdadero o falso en un tiempo finito? ¿Hay una especificación para semejante «máquina» que le permita decidir si todos los enunciados decidibles de las matemáticas son o verdaderos o falsos? Contrariamente a las expectativas de muchos matemáticos, como Hilbert, la respuesta resultó ser «no». Alan Turing en Cambridge, e independientemente Emil Post y Alonzo Chuch en Princeton, encontraron enunciados tales que cualquier máquina idealizada necesitaría un tiempo infinito para demostrar su verdad. Son, en efecto, infinitamente más profundos que la lógica de la computación paso a paso.

Para nuestros fines, un constructivista es un formalista con una mano atada a la espalda. Limitando al matemático a sólo algunas de las reglas que estaba acostumbrado a utilizar, el alcance de sus deducciones se reduce. El musicólogo podría adoptar una visión de la música igualmente ascética, y concebir músicas diferentes cuyas reglas de composición estuvieran limitadas de diferentes maneras. Visto así, uno puede sentir la frustración que sentiría el compositor al que se le asignara el conjunto de reglas más restrictivo y las menores notas. No podría hacer nada que no pudieran hacer otros compositores, pero muchas cosas que éstos pudieran hacer estarían fuera de su alcance. Esta es la sensación que tienen muchos matemáticos con el constructivismo. Sin duda, algunas matemáticas se construyen de una manera formal, pero no parece haber ninguna razón para creer que todas lo necesitan. Una pregunta fundamental es si todas las matemáticas necesarias para describir el Universo físico están dentro del alcance del constructivista.

El sonido del silencio. Descomponiendo música

... no hay arte sin restricción. Decir que la música es un arte es decir que

obedece a reglas. El puro azar representa total libertad, y la palabra «constructo» significa precisamente revolverse contra el azar. Un arte está definido exactamente por el conjunto de reglas que sigue. El papel de la estética considerada como ciencia es enumerar dichas reglas y vincularlas con las leyes universales de la percepción.

ABRAHAM MOLES

Si pensamos que hay algo en el vínculo antiguo entre matemáticas y música, deberíamos intentar situar la música en una u otra de las cuatro casillas filosóficas que acabamos de introducir —o quizá, como suele ser mejor con las matemáticas, poner una música en una categoría y otra en otra—. Hemos concluido que la visión platónica (absolutista) de la música parece innecesariamente metafísica. Nos pide que creamos que el compositor descubre la música, en lugar de inventarla. Ahora bien, aunque una visión platónica de las matemáticas puede presentar otras pruebas en su apoyo —por ejemplo, el hecho de que matemáticas puras, obtenidas hace tiempo, den tan a menudo una descripción física de alguna parte del Universo físico— la filosofía platónica de la música, pese a su antigüedad, tiene poco que decir. Adolece de todas las debilidades de la visión platónica de las matemáticas, pero a cambio no posee ninguna de sus virtudes. La Naturaleza no manifiesta una estructura musical; las creaciones musicales no son culturalmente independientes; tampoco tienen muchas capas de estructura inesperadas que las vinculen con otras creaciones musicales formalmente distintas. La música puede ser generada, puede ser inventada, pero ciertamente no puede ser descubierta.

Mientras que hay factores comunes que vinculan las matemáticas desarrolladas por individuos diferentes en culturas diferentes, la música implica todo lo contrario. Sus pautas y ritmos difieren significativamente de una cultura a otra; los factores comunes son sus funciones. En los países musulmanes de África del Norte y el Oriente Próximo hay poca influencia instrumental en la música. Es monofónica, dominada por la voz que canta, y característicamente poco melodiosa para oídos occidentales. En el África austral, el estilo cambia de nuevo, con ritmos múltiples aportados por muchos ejecutantes. Toda esta diversidad es un argumento convincente contra una visión platónica de la música, sin llegar a plantear una objeción a la que debe enfrentarse la mejor fundada visión platónica de las matemáticas: ¿cómo entramos en contacto con este otro mundo de formas musicales? Aunque cabría esperar que pudiéramos comunicamos con los extraterrestres utilizando el lenguaje de la música, no esperaríamos hacer muchos progresos utilizando música.

La propia visión de la música de Platón, como su opinión de las demás bellas artes, consistía en considerarlas como pálido reflejo de las formas ideales invisibles de la armonía universal. Su interés en la música estaba básicamente confinado a las armonías éticas que pudieran fluir de su interpretación, y cuya apreciación podría acercamos al armonioso mundo ideal del que se extraía su estructura. Por el contrario, Aristóteles, discípulo más pragmático de Platón, se dio cuenta de que el placer que aporta la música tenía un valor que debía algo a la impresión que causaba en nosotros la personalidad del intérprete. Las formas ideales no eran suficientes para explicar todas las facetas individuales que nosotros encontramos en la música. E incluso si lo fueran, ¿realmente habríamos explicado algo? Nos quedaríamos con un cielo platónico lleno de formas musicales, cuyas características armoniosas seguirían necesitando explicación.

Formalismo y constructivismo difieren como visiones de las matemáticas porque hay formas de deducción matemática que no pueden reducirse a

deducciones paso a paso a partir de los números naturales 1, 2, 3, 4... Es decir, hay pasos deductivos que un computador no podría realizar en un tiempo finito. Esta posibilidad no existe en la composición musical, y por ello una filosofía formalista de la música es, en la práctica, una filosofía constructivista. Es decir, supone que existe un conjunto de bloques constituyentes musicales —notas, intervalos y demás— junto con el conjunto de reglas para combinarlas para producir frases, melodías y así sucesivamente. La «música» es el conjunto de todas las aplicaciones posibles de las reglas a los bloques constituyentes. Se han hecho progresos considerables explorando un análisis de este tipo gracias al trabajo pionero de Christopher Longuet-Higgins en la Universidad de Sussex. Él ha aislado muchas de las características estructurales esenciales que están incorporadas en la composición musical clásica en Occidente, haciendo resaltar la estructura temporal que introducen los intérpretes expertos en su interpretación, lo que las hace personales para ellos y atractivas para el oyente. El éxito de este aislamiento de características definitorias de la música atractiva puede ser entonces puesto a prueba programando un computador para componer e interpretar de acuerdo con los mismos principios. Lo que pretende esta producción de música generada por computador no es reemplazar la interpretación humana, sino utilizar los matices de la composición e interpretación musical como un test formidable de los intentos de crear formas de inteligencia artificial. Si pudiéramos entender lo que hace el cerebro al construir música, habríamos descubierto algo fundamental sobre su funcionamiento.

La armonía existe porque ciertas combinaciones de notas se estiman más agradables que otras. Una teoría de la armonía tiene que describirlas y explicar por qué algunas parecen más naturales que otras. Longuet-Higgins ha argumentado que puede utilizarse un modelo sencillo para la asignación de una clave musical. Demuestra que todo intervalo musical puede representarse, de una manera unívoca, por una combinación de tres

variables: octavas, quintas perfectas y terceras mayores. Parte del espacio tonal infinitamente repetitivo de terceras mayores y quintas perfectas se muestra en la Figura 5.4. Cuando un oyente escucha un pasaje musical, le atribuye una clave seleccionando una región de este espacio. Dentro de una clave dada, uno puede ignorar la dependencia en octavas y tratar el espacio tonal como si fuera bidimensional, como se muestra en la Figura 5.4. Si la elección de clave da como resultado que el oyente tenga que hacer grandes saltos en la tabla, entonces él abandona la elección y selecciona otra región de la tabla (es decir, una clave diferente) donde la secuencia de tonos pueda representarse de forma más compacta. Las notas de cualquier escala se dan en grupos vecinos, cuyas formas están determinadas por el hecho de que la clave sea mayor o menor. A partir de esta pauta sencilla, Longuet-Higgins es capaz de poner de manifiesto todas las maneras en las que los compositores pueden modular de una clave a otra con al menos una nota compartida[60].

[60] Es interesante que esta estructura es la del grupo matemático. No es suficientemente grande para ser equivalente a la aritmética en conjunto, pero parece igualar la estructura de una aritmética en la que sólo se incluyen adición y sustracción (no multiplicación ni división). Esta aritmética «de Presburger» más pequeña es decidible y no muestra el dominio de la aritmética que debe exhibir incompletitud de Gödel.

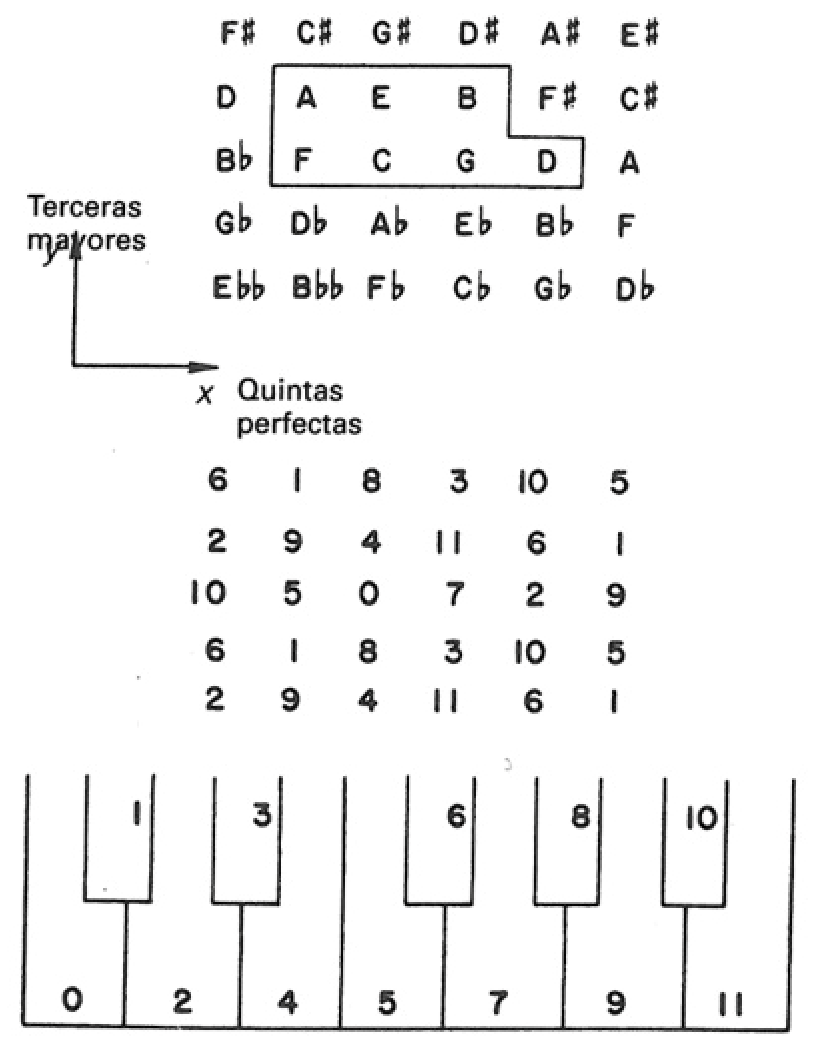


Figura 5.4.[61] *Una representación del espacio tonal que subyace a la atribución de claves musicales propuesta por Christopher Longuet-Higgins. Dentro de una clave dada, todos los intervalos armónicos están especificados por una configuración bidimensional de quintas perfectas y terceras mayores. Dentro de esta configuración cada nota está afinada una quinta perfecta más alta que la nota a su izquierda, y una tercera mayor más alta que la nota que está inmediatamente debajo de ella. Por lo tanto, si marcamos las notas dentro de cualquier clave dada, aparecen en grupos de notas adyacentes, y estos grupos tienen formas diferentes según la clave sea menor o mayor. Las modulaciones entre claves utilizan el hecho de que dos claves cualesquiera*

[61] Equivalencia de notas: A = la; B = si; C = do; D = re; E = mi; F = fa; G = sol. *(N. del t).*

tendrán al menos una nota en común (C mayor está contorneada en la figura). Un oyente atribuye una clave a un pasaje musical seleccionando una región de la configuración. Si esta elección da como resultado que haya que dar grandes saltos dentro de la región escogida, se abandona y se selecciona otra región en la que los tonos están agrupados de forma más económica, y se atribuye una nueva clave.

Hay muchas maneras de interpretar un conjunto dado de notas musicales. Algunas suenan atractivos al oído; otros no. Esto significa que las reglas necesarias para generar música interesante por medios artificiales —y, por consiguiente, para definirla unívocamente como un formalismo lógico— tienen que ser mucho más extensas que los ingredientes usuales de incluso la más detallada partitura musical. Sin embargo, la incapacidad del oído para discriminar sonidos que están demasiado próximos en tono e intensidad limita incluso estas reglas no escritas a un número finito. En matemáticas, las reglas que gobiernan los pasos lógicos permitidos son inequívocas y fácilmente establecidas. Si pudiéramos representar delante de nosotros el enorme mar de deducciones matemáticas que se siguen de todas las posibles hipótesis de partida, o axiomas, entonces muchos de estos enunciados estarían vacíos de interés para los matemáticos. En cualquier caso, serían deducciones lógicas, y por ello parte de las matemáticas tal como están definidas. Sin embargo, la versión musical de esta situación encuentra el reino de la música dominado por una enorme cacofonía de sonidos que no son «musicales» en el sentido convencional. Las reglas para colocar la nota siguiente no están en la práctica bien definidas a la manera en que está encorsetada la lógica matemática. Podríamos hacerlas así, pero habría muchas maneras de hacerlo; cada una de ellas produciría una definición diferente de música y un catálogo de secuencia sonoras que el oído avezado podría distinguir fácilmente. No hay ninguna «regla» para generar la nota siguiente en una pieza musical que dependa sólo de la última nota, o incluso

de todas las notas interpretadas hasta entonces. Así, la imagen formalista de la música como el conjunto de todas las secuencias de sonidos posibles que se desarrollan a partir de todas las posibles primeras notas utilizando todos los desarrollos posibles no captura lo que distingue la música del ruido.

Si pudiéramos examinar todas las secuencias posibles de símbolos musicales, encontraríamos que casi todas ellas son aleatorias —en el sentido de que ninguna abreviación de ellas podría transmitir toda su información musical a algún otro—. La mayoría de las secuencias de números carecen de pauta y son aleatorias en este mismo sentido. No pueden ser abreviadas reemplazando su contenido de información por una regla más breve, una fórmula u algún otro artificio mnemotécnico. De todas formas, ha habido intentos de generar todas las secuencias musicales posibles —dentro de ciertos límites—. Mozart escribió en cierta ocasión un vals que daba once variaciones posibles para catorce de los dieciséis compases, con dos opciones adicionales para la interpretación de uno de los otros dos compases. Esto da 2×11^{14} valses posibles —suficientes para mantener a un millón de parejas de bailarines ocupados durante dos millones de años—. Más recientemente, David Mutcer, un profesor de ingeniería eléctrica de Harvard, programó un sintetizador para generar sistemáticamente todas las melodías de cincuenta notas que pueden crearse seleccionando cada nota de entre las ochenta y ocho del teclado del piano. El momento en que había que tocar cada nota se decidía mediante un generador de números aleatorios. El computador empezaba entonces a listar todas las secuencias posibles de cincuenta notas. Con el tiempo se listarían todas las 88^{50} melodías posibles. Este número es fabuloso —hay «solamente» unos 88^{41} átomos en el Universo visible— y en el curso del experimento sólo se generó una minúscula fracción de posibilidades. Como cabría esperar, la inmensa mayoría de las «melodías» producidas hasta ahora por la Máquina musical de Mutcer son indistinguibles del ruido, aunque ocasionalmente surgirá una canción agradable y vagamente familiar. Pero incluso con una conocida melodía de 50 notas, la

versión generada por computador sonará plana y poco interesante para la mayoría de los oídos, porque el proceso de generación no permite variación en los intervalos entre notas, y excluye todas las posibilidades armónicas que se añaden cuando suenan al mismo tiempo acordes múltiples en lugar de notas únicas.

El juego de imitación. Languidez

En definitiva, toda la confusión de valores procede de la misma fuente: el desprecio de la importancia intrínseca del medio.

JOHN DEWEY

Hay una manera útil de clasificar los atributos de las cosas que encontramos en el mundo. Los atributos más simples son aquellos para los que existe un procedimiento definido para determinar si algo lo posee o no. Los seres humanos pueden a veces realizar este test sin ayuda de máquinas; por ejemplo, podemos decir si un objeto flota en el agua o si un número dado es par o impar. Los tests para algunos atributos, aunque sencillos en principio, son extremadamente laboriosos de realizar: por ejemplo, en teoría siempre podemos decir si un número es primo o no, pero si el número es grande, necesitaremos la ayuda de un computador rápido, y si el número es muy grande (con miles de dígitos), entonces incluso nuestros computadores más rápidos podrían necesitar miles de años para decirlo. De todas formas, en teoría, la comprobación podría llevarse a cabo para cualquier número dado, y la respuesta encontrada sería «primo» o «no primo». Reflexionando sobre esto, vemos que buena parte de nuestro sistema educativo está dedicado a enseñar a los jóvenes (y no tan jóvenes) a detectar la presencia o ausencia de atributos de esta manera: «¿es esto un verbo?»; «¿es esta frase gramaticalmente correcta?»; «¿es este triángulo equilátero?», y así

sucesivamente. Estamos tan acostumbrados a la solución tecnológica de nuestros problemas que es fácil sacar la falsa idea de que podemos decidir la presencia o ausencia de cualquier atributo de un modo similar, simplemente haciendo computadores más rápidos. No es así ni mucho menos. De hecho, ni siquiera es posible decidir la verdad o falsedad de todos los enunciados de la aritmética mediante implementación de un programa informático[62]. Así pues, existen atributos del mundo cuya verdad o falsedad no puede decidirse por la aplicación de un test que necesite implementar un número finito de pasos.

Otra propiedad que podemos pedir de un atributo del mundo es que sea «listable»: es decir, ¿existe un procedimiento definido que liste todos los ejemplos que poseen el atributo? Esta lista podría ser infinita (como sería el caso si el atributo fuera algo como ser un número par), en cuyo caso el proceso de listado continuaría indefinidamente. La «listabilidad» difiere de la decibilidad porque, aunque un atributo puede ser listable, puede no haber ninguna manera de listar todas las entidades que poseen el atributo en cuestión. El problema de decidir si esta página está escrita en un lenguaje ortográficamente correcto es un problema decidible. La página contiene un número finito de palabras, y cada una de ellas puede ser comparada con las entradas del diccionario en todos los casos y tiempos verbales. (Esto es lo que hace el «corrector ortográfico» de un procesador de textos). Cada palabra puede juzgarse correcta o incorrecta por ese (o cualquier otro) criterio. De todas formas, esta página de palabras inmaculadamente escritas podría seguir estando garabateada en cualquier lenguaje conocido. Sin embargo, aunque un corrector ortográfico no encontrará ninguna incorrección en la página, el texto seguiría siendo carente de significado para un lector que no supiera nada de la lengua en la que está escrito. A medida que el lector fuera aprendiendo dicha lengua, las partes de la página irían

[62] Sin embargo, sí es posible para todos los enunciados de la geometría euclídea.

adquiriendo significado; pero no podríamos predecir qué partes se harían inteligibles, ni podríamos predecir si el lector escribiría una página idéntica en el futuro. La propiedad de ser una parte inteligible del lenguaje es así listable pero no decidible.

Por desgracia, la verdad no es una propiedad listable ni decidible; ni lo es la verdad de un enunciado de la aritmética. El lógico norteamericano John Myhill ha utilizado el término «prospectivo» para caracterizar aquellos atributos del mundo que no son listables ni decidibles. Son propiedades que no pueden reconocerse mediante la aplicación de una fórmula hecha para conformarse a una regla o generada por algún programa informático. Están caracterizadas por una incesante novedad que no puede ser abarcada por ningún conjunto finito de reglas. «Belleza», «fealdad», «verdad», «armonía», «simplicidad» y «poesía» son nombres que damos a algunos de los atributos de este tipo. No hay manera de listar todos los ejemplos de belleza o fealdad, ni ningún procedimiento para decir si algo posee o no cualquiera de estos atributos sin redefinirlos de alguna manera más restrictiva que mata su carácter prospectivo.

La división de los atributos del mundo en aquellos con propiedades decidibles, listables y prospectivas ayuda a clarificar dónde fallan los intentos de imponer filosofías de las matemáticas a la música. Podríamos listar todas las secuencias sonoras posibles generadas por una lista prescrita de instrumentos que tocan solos o al unísono, pero no podríamos implementar un criterio universal para decidir si sonarían armoniosos o no, ni podríamos escribir un programa que generara el subconjunto de todas las pautas sonoras que fueran «armoniosas» —y mucho menos «significativas»— para el oyente humano. El atractivo musical es una propiedad prospectiva. Si parece que pudiera ser listable o decidible es solamente porque, como las palabras en una página, la música se escribe utilizando un número finito de marcas simbólicas en hojas de papel. Pero esa receta es necesariamente

incompleta, y gran parte del atractivo de la música se añade en el proceso especial de traducción que llamamos interpretación.

La filosofía invencionista es una explicación implausible para el conjunto de las matemáticas porque no explica la irrazonable efectividad de las descripciones matemáticas de la Naturaleza —descripciones que son más impresionantes cuanto más nos alejamos de los fenómenos de, la experiencia humana inmediata y pasada—. Una filosofía invencionista de la música es más convincente. Ve la música simplemente como una actividad de los músicos. Su carácter es universal sólo con respecto a ciertos elementos psicoacústicos asociados a características fisiológicas o neurológicas comunes a los oyentes humanos o que apelan a las propiedades universales del sonido. En otros aspectos refleja la diversidad de culturas humanas, de tendencias sociales y de nuestras reacciones a dichas tendencias.

El sonido de la música. Oír y escuchar

Somos reacios, en lo que se refiere a la música, a examinar nuestras fuentes de placer o tensión. En parte tememos el propio éxito —tememos que entender pudiera estropear el disfrute—. Es exacto: el arte a menudo pierde poder cuando se exponen sus raíces psicológicas.

MARVIN MINSKY

La explicación adaptacionista para la llegada y maduración satisfactoria de una capacidad como la musical atribuye su ubicuidad al hecho de que, en resumidas, cuentas, su posesión es ventajosa para los seres humanos. Alternativamente, se podría poner mayor énfasis en los aspectos instintivos

de la capacidad mental y tratar de demostrar que está modelada principalmente por la selección natural, en lugar de ser adquirida por aprendizaje o como un subproducto de la programación genética para alguna otra cosa[63]. Por el contrario la mayoría de los psicólogos sociales tratan de atribuir las capacidades humanas a los contextos sociales concretos dentro de los cuales se desarrollan los individuos o a la interacción repetida entre individuos. El científico social podría ver el estilo y el contenido musical como un producto de intereses humanos específicos o restricciones económicas. Desde otro punto de vista, un físico podría tratar la armonía musical simplemente como un fenómeno sónico recibido por un analizador de frecuencias (el oído) conectado a un computador (el cerebro) que es sensible a pulsos de sonidos estructurados dentro de intervalos prescritos de frecuencia e intensidad. Sería necesaria otra rama de estudio, la «psicoacústica», para descubrir la relación entre las principales propiedades físicas del sonido —su frecuencia, intensidad o variación espectral— y las cualidades de tono, sonoridad y timbre percibidas por los oyentes. En el resto de este capítulo veremos qué luz puede arrojarse sobre la Naturaleza e influencia del sonido musical adoptando el punto de vista del físico. Esto nos ayudará a aislar qué propiedades de la música se hacen inevitables para nosotros por las características fisiológicas y neurológicas de la condición humana.

Una obra de arte debería mostrar orden en algún nivel discernible —preferiblemente en muchos niveles—. Este ordenamiento significa que hay una pauta y un conjunto de reglas para combinar sonidos o colores de acuerdo con el medio empleado para representar la pauta. En el caso de la música, los resultados pueden verse de cuatro maneras: en términos de las materias primas utilizadas, los sonidos que transmite la música, las

[63] Por supuesto, incluso las capacidades «innatas» deben tener un origen y una *raison d'être* asociada. Su estructura inicial debe aparecer o bien por puro azar, a través de selección que actúa sobre alternativas, o porque constituyen el único diseño que conseguirá un efecto beneficioso concreto.

respuestas psicológicas a ellos o el contenido de información de la música. Una comprensión de lo que «es» la música requiere una discusión de todos estos aspectos. Ninguno de ellos por sí solo puede dar la imagen completa, pero cada uno ofrece intuiciones importantes. Por ejemplo, podemos estudiar la música como un fenómeno acústico para descubrir si la música emocionalmente atractiva posee características comunes; entonces, relacionando dichas propiedades con nuestro aparato perceptivo, podríamos descubrir por qué algunas pautas acústicas producen fuertes respuestas psicológicas.

Deberíamos empezar poniendo la música en un contexto acústico más amplio. Lo que llamamos el «tono» de un sonido está determinado por la frecuencia de la vibración que excita nuestros oídos. Cuando los sonidos tienen frecuencias más bajas que unos 16 ciclos por segundo[64] dejamos de oírlos y empezamos a sentirlos como vibraciones en nuestro entorno. Este dominio de frecuencias muy bajas se denomina la región infrasónica[65]. Por encima de 20 kHz, los sonidos entran en la región ultrasónica —una vez más, fuera del rango de nuestra audición, aunque los niños pequeños pueden oír en general frecuencias ligeramente más altas que los adultos—. Muchos animales, como los gatos y los perros, pueden oír frecuencias mucho más altas: hasta 60 kHz en el caso de los gatos. Pero con un umbral superior que es 1250 veces mayor que el inferior, el rango de frecuencias sonoras a las que es sensible el oído humano es enorme frente el rango minúsculo, apenas un valor doble del umbral superior frente al inferior, de frecuencias luminosas que el ojo humano puede detectar. La densidad y la calidad mucho mayor de la información que procesa el sentido de la vista sale enormemente cara en términos de recursos del cerebro. Extender dichas

---

[64] Un ciclo por segundo se denomina también un «herzio» y se denota por la abreviatura Hz; un millar de Hz se denota por 1 kHz (un kiloherzio).

[65] Puede hacerse una comparación interesante entre este umbral inferior y la frecuencia de las denominadas ondas «alfa» cerebrales, a 10 Hz, que se dan cuando uno cierra los ojos y piensa en algo no visual. Se detienen si se abren los ojos.

capacidades visuales sobre un rango de frecuencias mucho más amplio no hubiera representado la utilización óptima de recursos mentales en un ambiente que estaba en oscuridad la mitad del día.

Después de la frecuencia, la propiedad más importante del sonido es su nivel de intensidad: su volumen sonoro. De nuevo, la fisiología humana determina qué niveles sonoros podemos oír. El umbral inferior de audibilidad humana define el nivel de decibelios cero, y los sonidos por encima de aproximadamente 130 decibelios son suficientemente intensos para producir sordera. Estos números requieren una explicación adicional. Los niveles de intensidad sonora se miden normalmente en «decibelios», donde un decibelio (abreviadamente dB) se define como diez veces el logaritmo (en base diez) del nivel sonoro en unidades de un nivel de intensidad de 10^{-12} vatios por metro cuadrado. Esto suena un poco bizantino, pero se define así para que un decibelio sea igual aproximadamente al sonido más débil que puede oír una persona normal. Así, una intensidad sonora que es mil veces el nivel básico correspondería a 30 dB. Es útil comparar estos números con los niveles sonoros más familiares: el ruido de los árboles sujetos a la brisa, cuando caminamos por el bosque en un día de primavera, produce de 10 a 18 dB, una orquesta produce entre 40 y 100 dB; una conversación ordinaria produce unos 65 dB, pero un susurro poco más que 16 dB; el tráfico a la hora punta puede generar 30 dB; un martilleo enérgico, o un trueno, crea unos 110 dB. Nuestro umbral inferior de audición testimonia una extraordinaria sensibilidad. El sonido audible más suave a una frecuencia de 1000 Hz es el resultado de que la membrana interna del oído es desplazada una décima parte del diámetro de un átomo de hidrógeno. Esto está sólo un poco por encima del nivel sonoro creado por el continuo golpeteo en el tímpano por parte de moléculas de aire a las temperaturas ordinarias[66]. En

[66] Si usted acerca el oído a una caracola marina, el «ruido del mar» que oye es el sonido de su flujo sanguíneo. La caracola apantalla el ruido de fondo que normalmente es predominante y lo hace inaudible. Un efecto similar se da cuando el oyente se encuentra en una habitación aislada acústicamente o en una cueva subterránea.

las Figuras 5.5 y 5.7 se muestran los dominios de intensidad y frecuencia que son accesibles al oído, junto con las regiones utilizadas en la música.

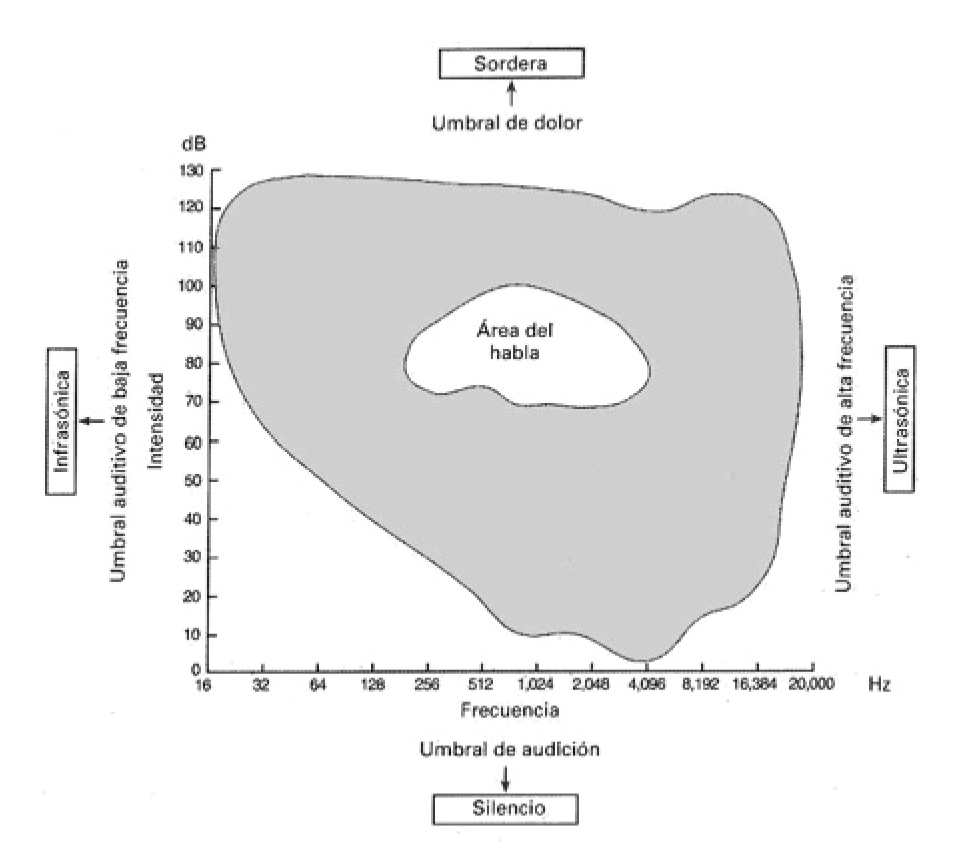


Figura 5.5. La región audible dentro del dominio de intensidad sonora (en decibelios) y frecuencia (medida en hertzios).

El sonido de la música percibido depende delicadamente de la arquitectura del oído. Como sucede con nuestros otros órganos sensoriales, el oído es una estructura de extraordinaria complejidad. El tímpano es una fina membrana que separa el oído medio del oído externo. Permanece en contacto con el aire a presión atmosférica a ambos lados vía la trompa de Eustaquio (véase la Figura 5.6). Una onda sonora incidente crea una sucesión de compresiones y dilataciones en el aire dentro del canal auditivo del oído externo. Esto produce variaciones de presión en el tímpano, que le hacen vibrar de un lado a otro. Estas vibraciones son transmitidas por una cadena de huesecillos, a lo

largo del oído medio, hasta una abertura en el oído interno, donde perturban un fluido que transmite las perturbaciones a la cóclea. A continuación, éstas perturban la membrana basilar, cuyos movimientos son registrados por minúsculas células ciliadas que son capaces de transmitir estas señales al sistema nervioso central donde, finalmente, se registra la sensación que llamamos «oír».

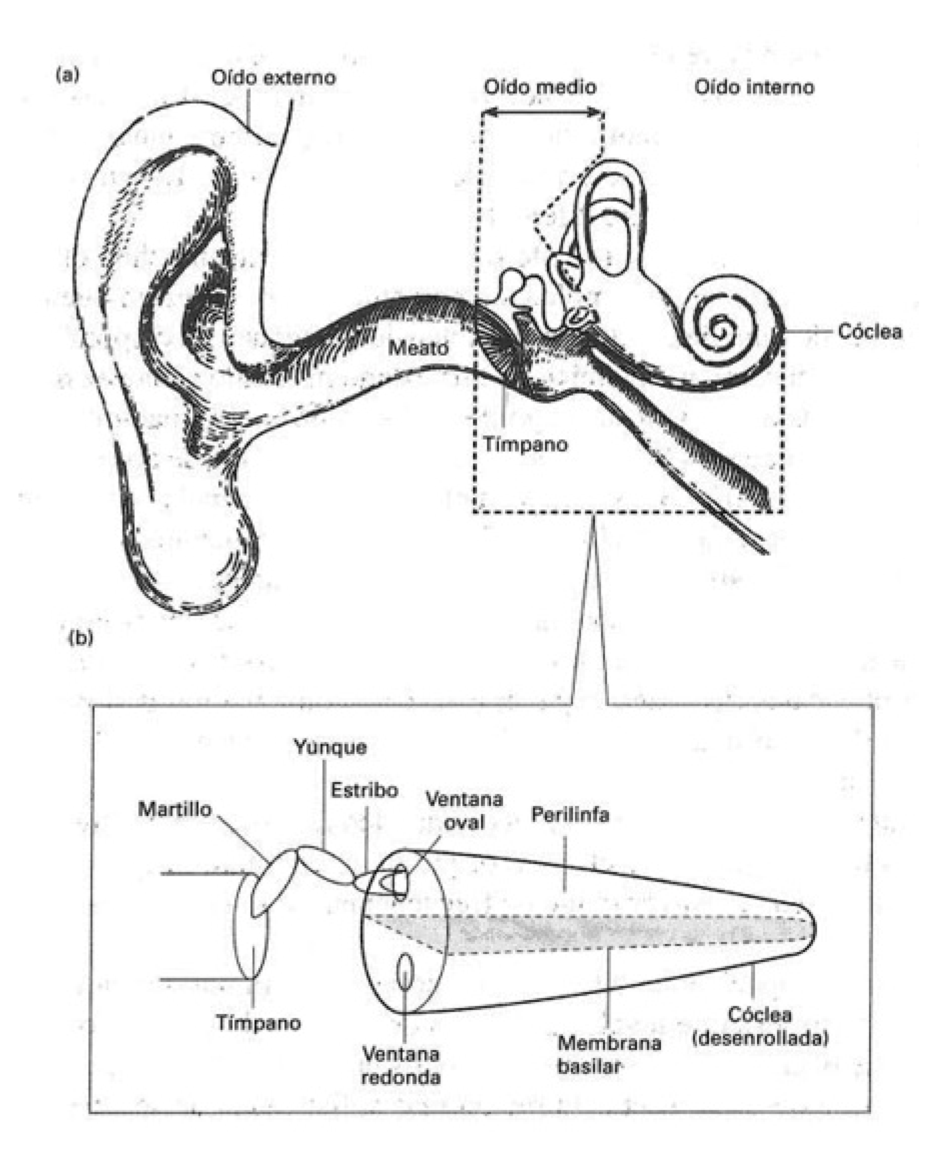


Figura 5.6. El oído humano; (b) detalle fino del oído medio e interno que muestra las componentes que transmiten las vibraciones del tímpano por la cadena de huesos (martillo, yunque y estribo), a través de la ventana oval,

donde las perturbaciones se crean en el fluido perilinfático que pone en movimiento la membrana basilar. Este movimiento es recogido por células ciliadas, cuya respuesta envía señales al sistema nervioso. Los sonidos de baja frecuencia activan las células ciliadas en el extremo lejano de la membrana; las altas frecuencias excitan sólo las células próximas al área de la ventana redonda.

Estas señales sólo son enviadas cuando las vibraciones incidentes tienen frecuencias en el rango «audible», 16 Hz a 20 kHz. Percibimos la frecuencia de estas oscilaciones como su «tono»; su amplitud, que aumenta con la magnitud de las variaciones de presión en el aire dentro del canal auditivo, se siente como «intensidad». El oído no responde por igual a todas las frecuencias incidentes dentro del rango audible: percibirá que sonidos con las mismas intensidades, pero diferentes frecuencias, tienen volúmenes sonoros ligeramente diferentes. Una característica interesante de la música, como muchos otros ejemplos de fenómenos complejos emergentes, es la forma en que ha evolucionado para llenar el dominio intensidad-frecuencia disponible. La historia muestra que la música se ha estado haciendo cada vez más intensa y más diversa en su rango de tonos. Antes del Renacimiento, el tono musical de las frecuencias fundamentales iba desde aproximadamente 100 a 1000 Hz, y reflejaba el rango de frecuencias de la voz humana. A medida que se han añadido nuevos instrumentos al repertorio orquestal, este rango se ha ampliado continuamente. La llegada de la música electrónica con sintetizador significa que ahora no hay prácticamente barreras para las frecuencias (o intensidades) de los sonidos musicales que pueden generarse. Una comparación de los dominios de la música prerrenacentista y la música orquestal del siglo XIX se muestra en la Figura 5.7.

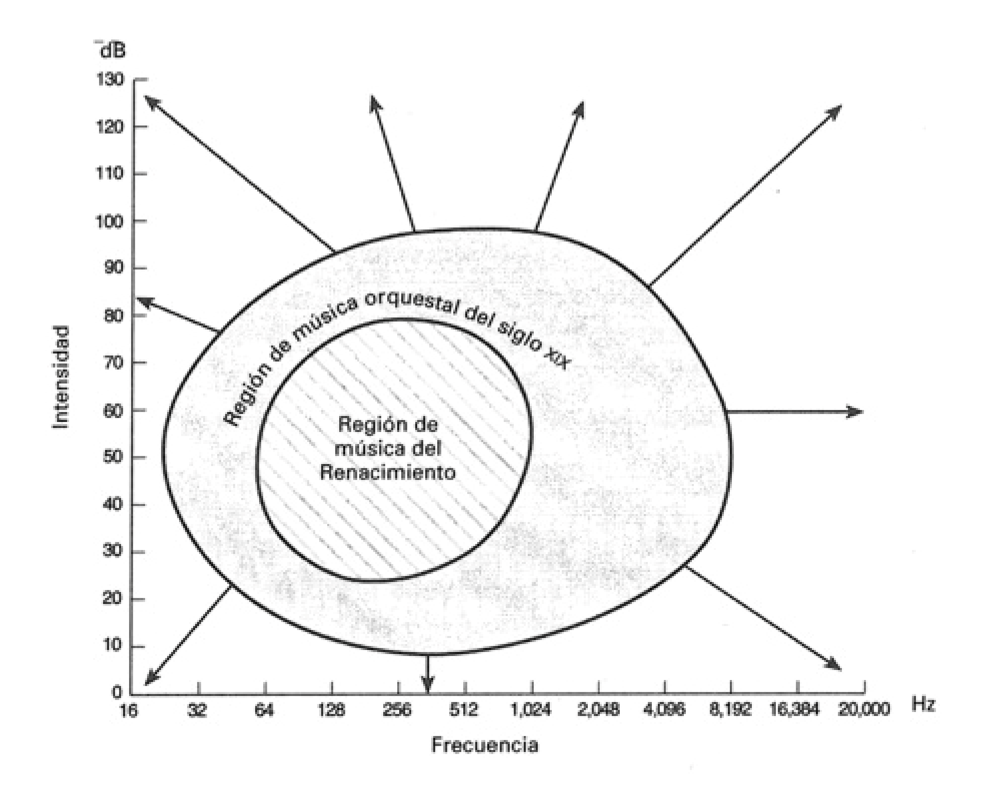


Figura 5.7. Los rangos de intensidades sonoras y frecuencias empleadas en la música occidental han evolucionado para llenar una fracción más grande del rango audible completo. Aquí el dominio de la música del Renacimiento se compara con el de la música orquestal del siglo XIX. La música electrónica moderna puede ser diseñada, en principio, para llenar todo el dominio audible de la Figura 5.5.

Cada instrumento tiene un rango dinámico relativamente estrecho, mucho más pequeño que el de la orquesta en conjunto, o que el del piano, que llena el mayor rango de frecuencias, como se muestra en la Figura 5.8.

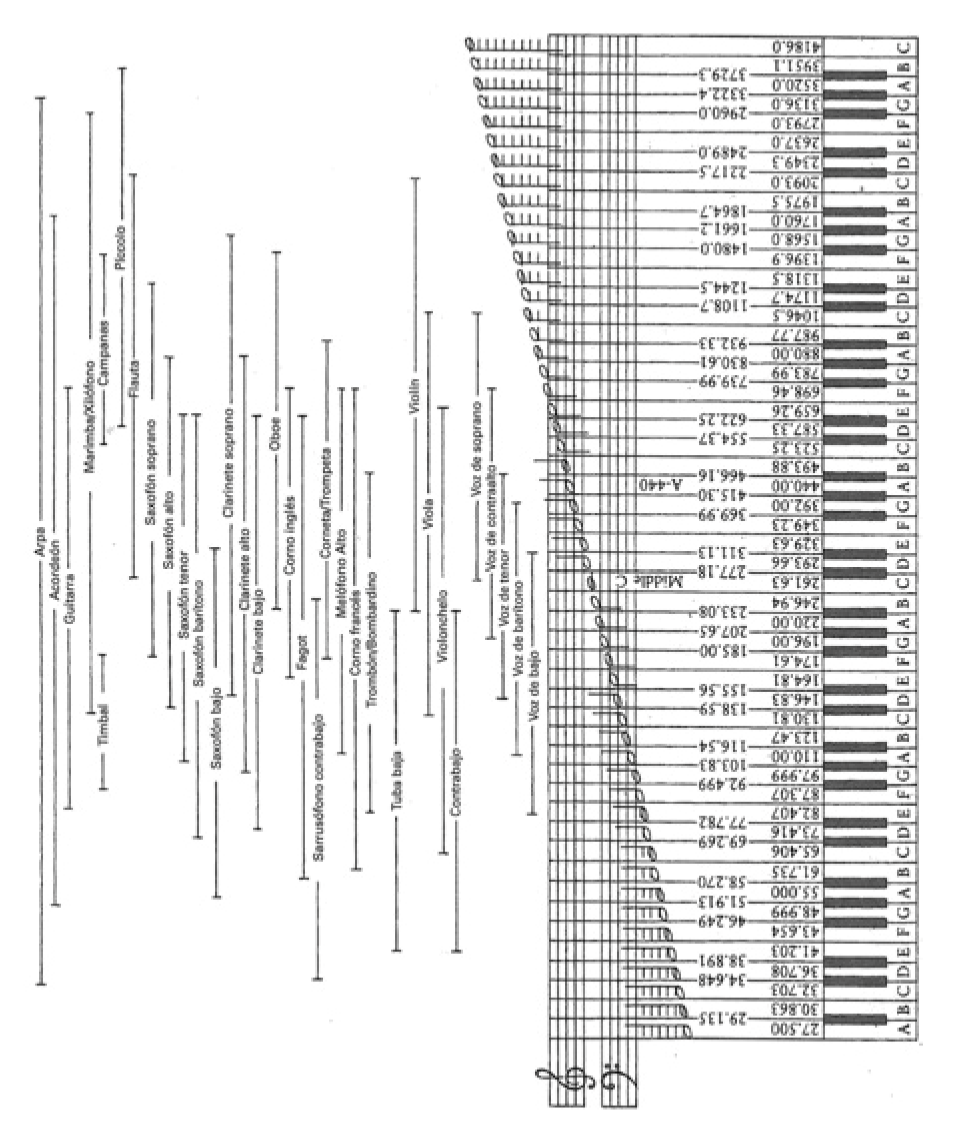


Figura 5.8. Los rangos de frecuencias de los instrumentos musicales modernos y las voces humanas comparadas con el rango del teclado del piano.

Nuestra capacidad auditiva ha evolucionado para interpretar cambios de tono más que niveles absolutos de tono. Se ha mostrado más económico invertir recursos neurológicos en sentir cambios de tono en lugar de desarrollar la calibración más sofisticada que se necesita para un reconocimiento de patrones absoluto. De todas formas, algunas personas tienen la capacidad de reconocer, o producir, notas en un tono absoluto. Esta envidiada capacidad se denomina «oído absoluto». Nuestros oídos son sensibles a cambios en

frecuencia de meramente una mitad de un 1 por 100 en el rango audible. El cerebro hace poco o ningún uso a largo plazo de la información sobre niveles de tono absolutos. La mayoría de nosotros recuerda esta información solamente durante algunos minutos. No se sabe si podríamos enseñar a niños muy pequeños a tener perfecto reconocimiento del tono en las tempranas etapas de su desarrollo mental, de modo que la información de tono llegue con el tiempo a almacenarse también en la memoria a largo plazo.

Otra curiosidad de nuestra sensibilidad a cambios de tono es que está infrautilizada en el sonido musical. La música occidental, en particular, está basada en escalas que utilizan cambios de tono que son al menos veinte veces mayores que los cambios más pequeños que podríamos percibir. Si utilizáramos al máximo nuestro poder discriminatorio, podríamos generar un mar ondulante de sonidos que mostrara una frecuencia cambiante de forma continua, similar a los cantos sónicos submarinos de delfines y ballenas.

Cuando el cerebro recibe secuencias de tonos musicales, hace lo mismo que hace con otras pautas: intenta «interpretarlas» sintiendo el mínimo número de matices dentro de la señal. Si esta estrategia falla para identificar la señal, el cerebro hace uso entonces de información almacenada en su memoria a largo plazo sobre experiencias similares anteriores. Esta información puede permitir que sean anticipados algunos aspectos de una señal futura —como sucede cuando oímos las primeras notas de una canción familiar—. Esta capacidad para extrapolar hacia adelante sobre la base de la experiencia pasada es una forma de esa capacidad que llamamos «inteligencia»; puede aumentar espectacularmente las probabilidades de supervivencia de un organismo. La forma alternativa de tratar este entorno es por reacción instintiva. Los instintos son respuestas preprogramadas a situaciones bien definidas; a diferencia de las respuestas aprendidas, no pueden ser actualizados continuamente. Las respuestas instintivas son mucho más simples y más económicas en su uso de programación y recursos

neurológicos. Son más «baratas» de desarrollar que los comportamientos aprendidos, pero es mucho más probable que se muestren desventajosas cuando se tropieza con novedades —como, por ejemplo, en forma de rápido cambio ambiental o nuevas formas de competencia—. De todas formas, los comportamientos instintivos no deberían ser considerados necesariamente como de segunda fila. Nuestro atributo más extraordinario, el del lenguaje, parece ser de este tipo instintivo.

Se han hecho estudios para identificar la respuesta del cerebro a la ausencia de un estímulo esperado. Hay un retraso con respecto a la respuesta que produce el estímulo esperado. Algún procedimiento de reevaluación entra en juego cuando el estímulo esperado se encuentra ausente. Podríamos asociarlo con la tensión que se crea cuando un desarrollo musical sigue caminos nuevos o inesperados, o cuando un sonido es inesperadamente discordante. Una obra musical muy compleja estimulará los nervios auditivos, y con ello el cerebro, para producir un gran número de encajes y extrapolaciones a una gran velocidad. El hecho de que los amantes de la música tengan una experiencia agradable al oír la misma pieza musical en muchas ocasiones sugiere que esta respuesta neurológica se da automáticamente cuando quiera que se escucha la música. Quienes obtienen poco o ningún placer de la música quizá tengan sistemas nerviosos auditivos que sólo pueden manejar información de este tipo a un ritmo más lento y, con ello la experiencia entera es poco o nada estimulante. Cuando se da algún cambio sutil en el sonido que estimula al amante de la música, y quizá produce también alguna otra emoción, los procesadores de sonido del oyente menos musical están ya saturados por el flujo subyacente de información musical; por ello esta nueva sutileza no produce ninguna respuesta —incluso si, a nivel puramente acústico, es oída.

La percepción del sonido musical también está influida por el escenario en que se oye. Este efecto ambiental es familiar para nosotros: todos pensamos que cantamos mejor en el baño, pero no tan bien al aire libre[67].

Aunque hemos estado construyendo auditorios desde la época de los primeros griegos, hace 2500 años, sus acústicas no eran plenamente entendidas, de una manera que les permitiera ser optimizadas para la interpretación musical, hasta los primeros años del siglo XX. Incluso hoy, los diseños para mejorar las calidades acústicas de una sala de conciertos pueden verse comprometidos por las necesidades de seguridad estructural, tamaño, coste y apariencia arquitectónica. Aunque muchos factores se combinan para determinar la calidad del sonido que oye una audiencia en un edificio, la característica más importante de un auditorio es su *tiempo de reverberación.* Este es una medida de la rapidez con que se desvanece la audibilidad de cualquier sonido reflejado. Más exactamente, es el tiempo requerido para que el sonido disminuya un millón de veces en intensidad (es decir, en 60 dB). Una buena sala de conciertos tendrá un tiempo de reverberación de unos dos segundos.

Es importante que el sonido decaiga suavemente, a un ritmo constante. Si el decaimiento fuera esporádico, u ocurriera rápidamente durante un segundo y se frenase luego, la música sonaría muy desigual. Nuestro sistema auditivo recibiría simultáneamente sonidos que se generaron en instantes diferentes y se enfrentaría al formidable problema de reconstruir su ordenamiento original frente a tiempos de decaimiento variables: entonces no seríamos capaces de discernirlos con suficiente claridad para reconstruir una frase musical suave.

---

[67] El sonido se refleja bien en las paredes duras y lisas de la ducha, y hay una considerable reverberación, que hace que el volumen sonoro de uno rivalice con el de Pavarotti. Además, muchas frecuencias naturales de vibración están disponibles en el aire a lo largo de las tres direcciones perpendiculares entre los dos pares de paredes opuestas, y entre el suelo y el techo (mientras que un instrumento de cuerda sólo puede sacar ventaja de ondas a lo largo de la dirección de la cuerda). Dichas frecuencias pueden ser excitadas por un cantante. Muchas de estas frecuencias están muy próximas y dentro del rango de frecuencias de la voz humana cantante; el que canta en el baño recibe así un impresionante soporte de fondo de muchas resonancias que se producen de manera natural.

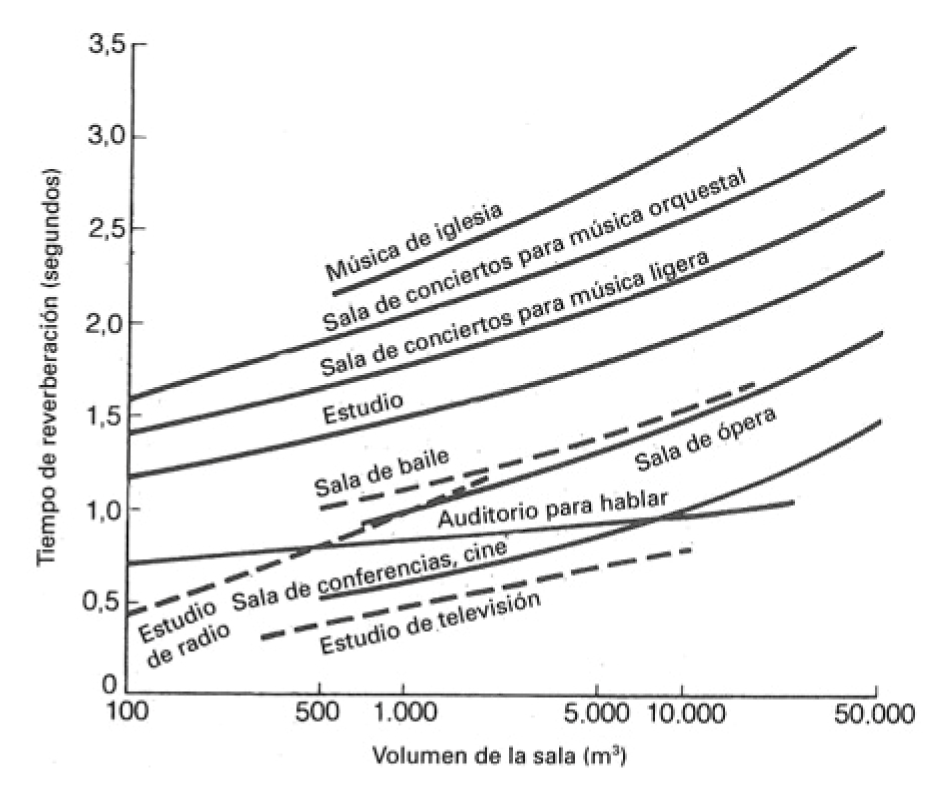


Figura 5.9. Los mejores tiempos de reverberación para edificios de volúmenes diferentes. El tiempo de reverberación óptimo depende del tipo de sonido que se está produciendo. Hay una reverberación excesiva cuando el auditorio es demasiado grande —normalmente porque el techo está demasiado alto— o donde las superficies interiores reflejan con demasiada facilidad el sonido incidente.

Para entender por qué hay tiempos de reverberación óptimos para diferentes variedades de sonido tenemos que ser conscientes del hecho de que aproximadamente tres cuartas partes de la intensidad del sonido se disiparán en una décima parte del tiempo de reverberación; después de esta cantidad de atenuación, el oído está listo para distinguir un nuevo sonido. Por consiguiente, una décima parte del tiempo de reverberación da, recíprocamente, el número de nuevos sonidos que el oído puede resolver por segundo cómodamente. Esto revela que deberíamos diseñar una sala de conferencias con un tiempo de reverberación de aproximadamente medio

segundo, de modo que una audiencia percibiera distintos nuevos sonidos a un ritmo de aproximadamente veinte por segundo —un buen ajuste para el ritmo de producción de nuevos sonidos por un hablante humano y de su recepción por un oyente humano—. Pero esta sala sería un mal auditorio para la música. Casi toda la música suena mejor en salas con un tiempo de reverberación de unos dos segundos, lo que proporciona a los oyentes cinco nuevos sonidos por segundo, próximo al ritmo de interpretación de notas en muchas formas de música. Si el tiempo de reverberación es demasiado largo, el sonido se hace confuso porque la audiencia oye simultáneamente demasiadas notas producidas en instantes diferentes. Pero si el tiempo de reverberación es demasiado corto, entonces cada sonido es oído como si estuviera aislado, en lugar de como una parte de una frase musical continua. En la Figura 5.9 se muestran algunos tiempos de reverberación para diferentes tipos de edificios cerrados.

Los ingenieros acústicos intentan predecir la calidad acústica de una sala de conciertos utilizando simulaciones por computador para descubrir cómo dependen las propiedades acústicas de características como la reflectividad de las paredes, el tamaño y forma de la sala o el lugar en que se encuentre el oyente en su interior. El pionero de estos estudios cuantitativos fue un notable científico norteamericano, Wallace Sabine, cuyo interés por tales problemas se despertó cuando, en 1895, la Universidad de Harvard le pidió que descubriera por qué las conferencias impartidas en la sala de conferencias de la universidad recién inaugurada en el Fogg Art Museum estaban resultando ininteligibles para sus audiencias. Dando muestra de una admirable confianza en la lucidez del profesorado de Harvard, Sabine inició un laborioso trabajo detectivesco utilizando diferentes fuentes de sonido y un cronómetro. Descubrió que el tiempo de reverberación muy largo de la sala (5,62 segundos en casi todas partes) era el responsable de hacer que los estudiantes pensaran que se habían matriculado en la Universidad de Babel. Colocando rellenos absorbentes en algunas de las paredes, y cojines en los

asientos, redujo la persistencia de la voz del conferenciante al rebajar el tiempo de reverberación a aproximadamente 1,1 segundos, y el problema de la universidad quedó resuelto, Sabine pasó a cosas mayores. En 1890 hizo el diseño acústico para la nueva Sala Sinfónica de Boston —que al decir de algunos sigue siendo, acústicamente, la mejor sala de conciertos del mundo—. Determinó el tiempo de reverberación óptimo para la música realizando ensayos con diversos músicos y oyentes entrenados para llegar a cierta unanimidad, y la diseñó en consecuencia[68].

Estilos de habla y de canto diferentes se oyen mejor en auditorios con tiempos de reverberación óptimos que varían con el volumen de la sala para diferentes tipos de generación de sonido estructurado; algunos se muestran en la Figura 5.9. Estas tendencias arrojan luz sobre el vínculo entre la evolución de los estilos musicales durante siglos y la naturaleza de los edificios en los que se interpretaba la música. La gran música coral y de órgano ejemplifica el lento y majestuoso sonido que se oye mejor en edificios como catedrales enormes, con grandes tiempos de reverberación. Así, los factores arquitectónicos realzan la atmósfera trascendental de este elemento musical del culto religioso.

Por el contrario, la música del período Barroco (1600-1750), que alcanza su clímax con Bach, estaba compuesta generalmente para ser interpretada en salas pequeñas, teatros e iglesias, con paredes muy reflectantes. Estos ambientes son más íntimos y tienen tiempos de reverberación relativamente cortos: en o por debajo de unos 1,5 segundos. Gran parte de la variación estilística que manifiesta la música en este período es un reflejo del amplio abanico de lugares, con diferentes tiempos de reverberación, en los que se pretendía que su interpretación sonara fresca y clara. Durante el período Clásico (1775-1825) que le siguió, la constitución de la orquesta de

[68] Hay muchos otros factores arquitectónicos que influyen en nuestra percepción de la música. Si, por ejemplo, el sonido que está produciendo cada uno de los intérpretes y sus colegas tarda demasiado tiempo en llegarles reflejado de las paredes, ellos empiezan a tener la sensación de que no están tocando juntos en un entorno íntimo, y su interpretación se resiente. Tiempos de retardo mayores de dos centésimas de segundo resultan perturbadores: las mejores salas de conciertos dan un retardo de entre dos milésimas y nueve milésimas de segundo.

conciertos evolucionó hasta su forma actual, aunque la música se interpretaba generalmente en salas de conciertos bastante más pequeñas que las que se utilizan hoy —típicamente con tiempos de reverberación próximos a 1,5 segundos, que aumentan hasta 1,8 segundos en los mayores auditorios del siglo XIX—. Ésta es una razón por la que la música clásica suena ahora mejor en salas de conciertos con este estrecho intervalo de tiempos de reverberación. Por el contrario, los últimos compositores románticos, como Tchaikovski y Berlioz, requieren mayores tiempos de reverberación para que se sienta plenamente el efecto emocional de su música. No es sorprendente enterarse de que dichas obras fueron escritas en una época en que podían ser interpretadas en las primeras salas de conciertos grandes con tiempos de reverberación de dos segundos.

Aventuras de Roderick Random. Ruido blanco, ruido rosa y ruido negro

De todos los ruidos, creo que la música es el menos desagradable.
SAMUEL JOHNSON

El mundo que nos rodea está lleno de pautas: de luz, de sonido y de conducta. Como resultado, el mundo se encuentra bien descrito por las matemáticas, porque las matemáticas son el estudio de todas las pautas posibles. Algunas de dichas pautas tienen expresiones concretas en el mundo que nos rodea, donde vemos espirales, círculos y cuadrados. Otras son extensiones abstractas de estos ejemplos mundanos, pero otras parecen residir solamente en las mentes fecundas de sus inventores. Visto así, vemos por qué tiene que haber algo afín a las «matemáticas» en el Universo en que vivimos. Nosotros, y todos los demás seres sintientes, somos en el fondo ejemplos de complejidad organizada: somos pautas complejas estables en el tejido del Universo. Para que haya vida con alguna figura o forma debe haber

un alejamiento de la aleatoriedad o la irracionalidad total. Donde hay vida hay pauta, y donde hay pauta hay matemáticas. Una vez que existe el germen de la racionalidad y el orden para convertir un caos en un cosmos, también lo hacen las matemáticas. No podría haber un universo no matemático que contuviera observadores vivos.

De todas formas, quizá podría haber existido solamente una pizca de orden en el corazón de las cosas. La parte de la realidad que se cruza con nuestra historia evolutiva provinciana podría ser una mera gota en un océano de irracionalidad. Alternativamente, el orden que hay detrás del mundo, y con ello las matemáticas necesarias para describirlo, podría ser de un tipo profundo e incomputable. Las pautas de la Naturaleza podrían ser indescifrables por cualquier subconjunto vivo de dichas pautas. Si la estructura matemática de un mundo semejante estuviera llena de las funciones esquivas e incomputables de Turing, entonces las matemáticas no ayudarían a sus habitantes a predecir el futuro, explicar el pasado o capturar el presente. Pero, una vez más, quizá tales mundos no estarían habitados por seres sintientes. Para que tales criaturas sobrevivieran en un entorno natural complejo, deberían existir algunas regularidades dentro de dicho entorno, y las mentes preconscientes deberían ser capaces de encarnar algunas de estas regularidades ambientales. Para que evolucione con éxito la complejidad debe ser capaz de almacenar representaciones de su entorno y realizar computaciones de complejidad cada vez mayor. El éxito de este proceso descansa en un cimiento de pautas fiables que puedan aproximarse paso a paso. Un mundo gobernado por estructuras matemáticas incomputables no permite que la vida evolucione por una sucesión de pequeñas variaciones, cada una de las cuales produce una adaptación mejorada a la realidad. Tales mundos carecerían de vida. Vista a esta luz, la existencia de un cierto nivel de orden discernible en el mundo natural no es inesperada ni misteriosa, al menos no más —y no menos— que su propia existencia.

Enfrentados a una conclusión de este tipo, necesitamos examinar más de cerca las pautas naturales que nos rodean. Las formas artísticas como la música son pautas también, pero parecen tener poco en común con la Naturaleza. La música no suena como una imitación de nada. Pero si hemos evolucionado para entender las pautas variables de un entorno complejo, puede haber formas de complejidad que se dan naturalmente y que nuestros cerebros están capacitados para aprender. En tales circunstancias cabría esperar que la apreciación artística emerja como un subproducto de aquellas adaptaciones evolutivas que se acomodan a pautas de variación vitales. La música que encontramos atractiva podría así compartir algunas características exhibidas por las pautas naturales de sonido.

Para encontrar la mejor manera de clasificar pautas sonoras naturales y artificiales es conveniente ver cómo estudian el sonido los ingenieros. Una cantidad útil es el *espectro de potencias* de la señal, que muestra cómo varía con la frecuencia el comportamiento promedio de una magnitud que cambia en el tiempo. Si el sonido es oscilatorio, el promedio se toma sobre un tiempo mucho mayor que el período de una simple oscilación (típicamente sobre más de treinta oscilaciones). Otra cantidad informativa, la *función de autocorrelación* de la señal, es una medida de cómo están relacionadas las señales en dos instantes t y $(t + T)$. Si la señal es en promedio siempre la misma, entonces la función de autocorrelación no dependerá del tiempo absoluto t, sino meramente del intervalo de tiempo, T, entre diferentes observaciones de la señal.

Secuencias sonoras definidas por un espectro de potencias son lo que físicos e ingenieros llaman «ruido». Una característica importante del espectro de potencias de muchas fuentes de ruido natural es que son proporcionales a una potencia matemática de la frecuencia de la señal sobre un intervalo muy amplio de frecuencias. En este caso, no hay ninguna frecuencia especial que caracterice el proceso —como sería el resultado de tocar repetidamente una nota con la frecuencia del la central, por ejemplo—. Tales procesos se

denominan *libres de escala.* Si dividimos por la mitad o duplicamos todas las frecuencias, entonces un espectro libre de escala seguiría conservando la misma forma. En un proceso libre de escala, cualquier cosa que suceda en un intervalo de frecuencias sucede en todos los intervalos de frecuencias. Si la música fuera exactamente libre de escala en todo su intervalo de frecuencias, un registro discográfico sonaría igual a cualquier velocidad (si se hicieran cambios compensatorios en el volumen). Obviamente, la voz humana está lejos de ser libre de escala durante todo el intervalo de frecuencias de la conversación normal, porque sabemos que una emisión acelerada de la voz humana suena característicamente como el Pato Donald[69]. Del mismo modo, un violonchelo o un violín suenan muy diferentes cuando se aceleran o se frenan; por el contrario ruidos puros libres de escala sonarían igual.

Los procesos libres de escala tienen espectros de potencias que son proporcionales a potencias inversas de la frecuencia f, como f^{-a}. El carácter del ruido cambia significativamente si se altera el valor de la constante a. Si el ruido es completamente aleatorio, de modo que cada sonido es completamente independiente de sus predecesores, entonces a es cero, y el proceso se denomina *ruido blanco* (véase la Figura 5.10a). Como la mezcla espectral a la que llamamos luz blanca, el ruido blanco es acústicamente «incoloro» —igualmente anónimo, uniforme e impredecible en todas las frecuencias, y ello a cualquier velocidad que se reproduzca—. Tiene autocorrelación nula. Cuando un televisor no recibe señal, la «nieve» que llena la pantalla es una muestra visual de ruido blanco que aparece debido al movimiento aleatorio de los electrones en los circuitos. A bajas intensidades, el ruido blanco tiene un efecto suavizante debido a su falta de correlaciones

[69] En el caso del inglés hablado, los sonidos del habla están estadísticamente no correlacionados, en promedio, sobre frecuencias por debajo de unos 2 Hz, pero se correlacionan como «ruido marrón» (véase p. 233) a frecuencias más altas. Por supuesto, una estrecha correlación entre ideas expresadas en palabras habladas no surge necesariamente del uso de sonidos cuyas frecuencias estén correlacionadas. Una larga serie de sonidos muy débilmente correlacionados puede producir un mensaje con importantes correlaciones semánticas a tiempos largos. No obstante, hay muchas lenguas no occidentales en las que las variaciones de tono en la voz desempeñan un papel importante en darles significado.

discernibles. Por esta razón, hay en el mercado máquinas de ruido blanco para producir un ruido de fondo tranquilizador que se parece al sonido de las olas que rompen suavemente.

La ausencia de cualquier correlación entre muestras de ruido blanco en instantes diferentes significa que su secuencia sonora es invariablemente «sorprendente» en el sentido de que no puede preverse el próximo sonido a partir de su predecesor. Por el contrario, un ruido libre de escala con $a = 2$ produce una secuencia de sonidos más correlacionada, llamada *ruido marrón* [70] (véase la Figura 5.10b). El ruido marrón resulta bastante indiferente al oído; su alto grado de correlación hace su curso bastante predecible. «Recuerda» algo de su historia. Cuando a se hace mayor que 3, entramos en el dominio de los *ruidos negros,* que son todavía más correlacionados (Figura 5.10c). Tales procesos parecen describir la estadística de una amplia variedad de desastres tanto naturales como debidos al hombre, desde terremotos y diluvios a hundimientos de bolsa y choques de trenes. La apariencia altamente correlacionada de tales catástrofes podría tomarse como una base para el viejo adagio de que «las desgracias nunca vienen solas». Ninguno de estos ruidos «coloreados» es estéticamente agradable. Producen secuencias de sonidos que son o demasiado predecibles o demasiado sorprendentes para estimular durante mucho tiempo las rutinas de análisis de pautas de la mente. Los ruidos negros o marrones no dejan ninguna expectativa insatisfecha, mientras que los ruidos blancos carecen de cualquier expectativa que necesite satisfacerse. Esto sugiere que en algún lugar entre estos extremos de sorpresa y predecibilidad nula podría haber pautas que contengan suficiente de ambas cosas para despertar nuestras sensibilidades.

---

[70] Esta terminología de color se debe a que el arquetipo para un proceso estadístico de este tipo es la difusión de pequeñas partículas en un líquido, observada por primera vez por el botánico escocés Robert Brown en 1827, y desde entonces denominado «ruido browniano» en reconocimiento de su descubrimiento. [La palabra inglesa «brown» significa marrón. (*N. del t).*]

Entre el ruido blanco y el marrón, cuando *a* está entre 0 y 2, se encuentra el dominio del «ruido rosa» (véase la Figura 5.11). El ejemplo más interesante es el caso intermedio en que *a* = 1, que los ingenieros llaman «ruido *1/f*» o «ruido parpadeante». La característica más interesante del ruido rosa es que está moderadamente correlacionado en todas las escalas de tiempo y, por ello, en promedio, debería mostrar una estructura «interesante» en todos los intervalos temporales.

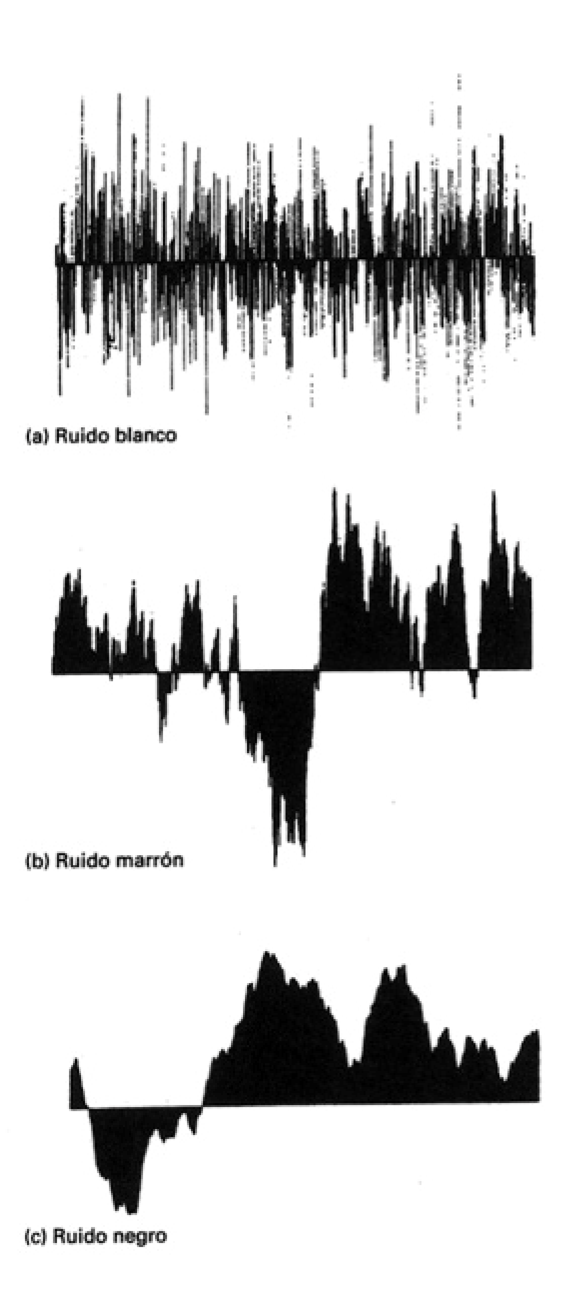


Figura 5.10. Muestras de (a) ruido blanco, (b) ruido marrón y (c) ruido negro.

En 1975 Richard Voss y John Clarke, dos físicos de la Universidad de California en Berkeley, analizaron una variedad de registros musicales y emisiones radiofónicas para ver si mostraban alguna afinidad espectral con ruidos libres de escala. Sus resultados fueron sorprendentes. Descubrieron que un amplio abanico de composiciones clásicas se aproximaban estrechamente por un ruido rosa 1/*f* en un amplio intervalo de frecuencias. Del mismo modo, se encontraban atractivas composiciones musicales sintéticas en las que tanto la frecuencia del tono como la duración de las notas eran seleccionadas a partir de estadística 1/*f.* Por el contrario, fuentes de ruido blanco y marrón se encontraban poco interesantes.

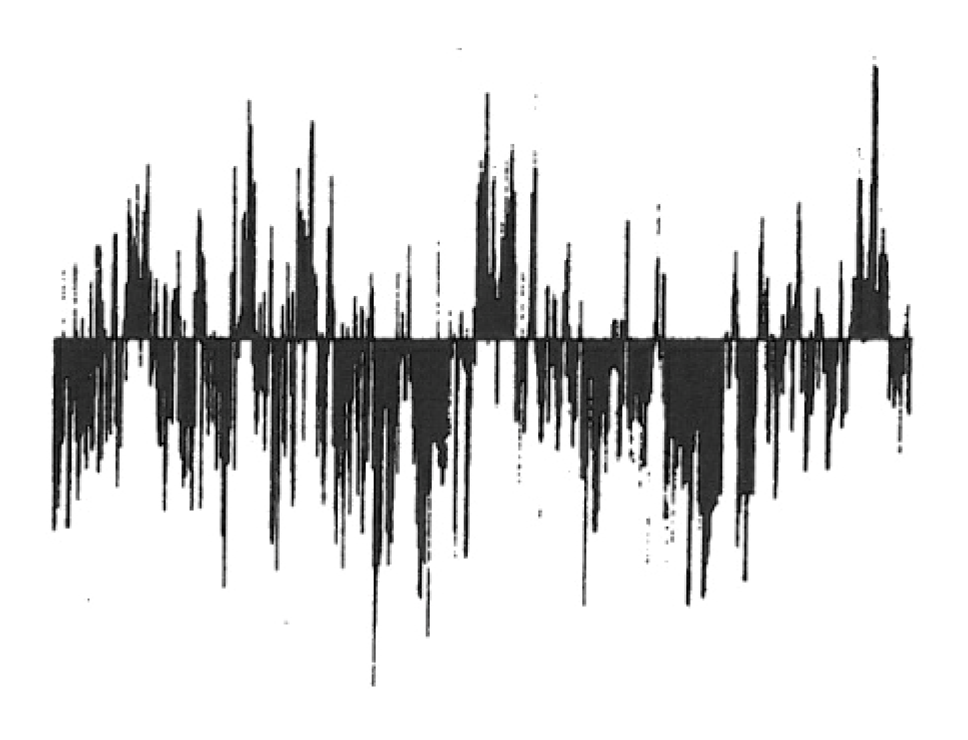


Figura 5.11. Muestra de ruido 1/f o «rosa».

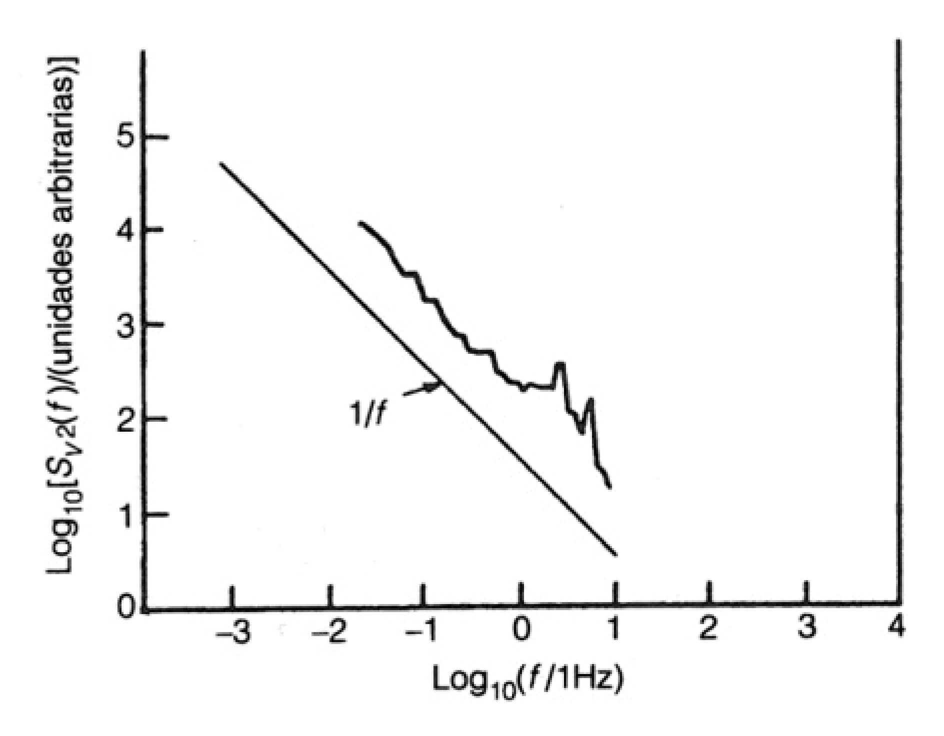


Figura 5.12. La densidad espectral de la potencia de audio («volumen sonoro») versus frecuencia sonora, f, en unidades logarítmicas para el Primer concierto de Brandeburgo de Bach, medida por Richard Voss y John Clarke.

Centrándose en composiciones musicales concretas, Voss y Clarke estudiaron primero la señal de audio de una interpretación del Primer concierto de Brandeburgo de Bach. El espectro, promediado sobre toda la interpretación, se muestra en la Figura 5.12. Como puede verse, el espectro tiene una pendiente cercana a la del ruido 1/*f* en casi todo su intervalo de frecuencias. Los dos picos abruptos entre 1 y 10 Hz están asociados, respectivamente, con el tiempo necesario para hacer sonar una única nota, y con el tempo musical particular utilizado por el compositor. A continuación, Voss y Clarke repitieron el experimento para una variedad más amplia de fuentes musicales: algunos *rags* para piano de Scott Joplin, una emisora de música de *rock,* una emisora de música clásica y un programa radiofónico de noticias y música. Sus espectros se muestran en la Figura 5.13 —de nuevo promediados sobre todo el registro (o sobre 12 horas en el caso de las emisoras de radio)—. Los resultados son sorprendentes. Hay una fuerte

tendencia de todas estas fuentes de «ruido» a seguir la pendiente espectral 1/*f*. Joplin tiene una estructura de frecuencia mucho más alta (es decir, corto intervalo temporal), alrededor de 1-10 Hz, que Bach —un reflejo de su estructura característica—, pero sigue estando próximo a un espectro 1/*f* por debajo de 1 Hz. El resultado promedio de las emisoras clásica, de *jazz* y de *rock* también se ajusta a la forma 1/*f* por debajo de las frecuencias que empiezan a registrar la longitud típica de una pieza musical emitida. El programa de noticias y música también muestra un espectro 1/*f* excepto por las interrupciones, que señalan el tiempo típico que necesita el emisor para pronunciar una palabra (aproximadamente 0,1 segundo), y la longitud de un ítem típico (aproximadamente 100 segundos). También puede verse el efecto del cambio de ruido blanco a marrón, característico del inglés hablado, alrededor de 2 Hz.

Una lección que se desprende de estos estudios es la naturaleza poco realista de mucha de la denominada «música estocástica», que produce música programando un generador de números aleatorios para seleccionar cada nota —como el generador de melodías de Mutcer del que hablamos antes—. Esto producirá un espectro parecido al del ruido blanco. Incluso si se programa una memoria de las pocas notas anteriores para introducir algunas correlaciones atractivas, el resultado es completamente diferente del que muestra un espectro 1/*f* para la intensidad y los intervalos entre notas, en un amplio intervalo de frecuencias como se muestra en la Figura 5.14. La «música» 1/*f* tiene correlaciones en todos los intervalos temporales; no puede reproducirse introduciendo un único tiempo de correlación característico por debajo del cual las notas están correlacionadas y por encima del cual no lo están. El tiempo de correlación único produce un espectro de ruido blanco hasta alguna frecuencia correspondiente al tiempo de correlación, pero luego las correlaciones en tiempos más cortos crean ruido marrón a frecuencias más altas.
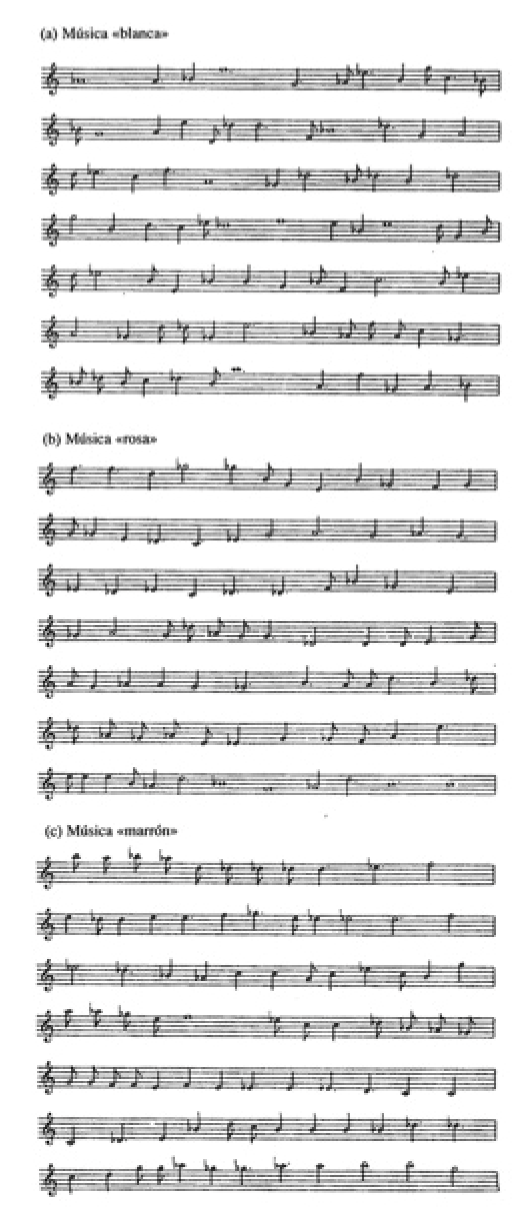


Figura 5.14. Ejemplos de composiciones musicales derivadas de notas seleccionadas en frecuencia y duración tomados de espectros de (a) ruido blanco, (b) ruido 1/f, y (c) ruido marrón.

El trabajo de Voss y Clarke parecía ser un paso importante hacia la caracterización de la música humana como un proceso casi fractal de complejidad intermedia en el intervalo de bajas frecuencias, por debajo de 10 Hz. Hizo que otros físicos interesados en el sonido y la complejidad reexaminaran con gran detalle lo que ellos habían hecho. Resultó que las

cosas no eran tan nítidas como ellos habían afirmado. Las longitudes de los fragmentos de música que se utilizan para determinar el espectro de correlaciones son cruciales, y una elección inadecuada puede sesgar los hallazgos globales. Trabajos de Nigel Nettheim y de Yu Klimontovich y Jean-Pierre Boon demostraron que el espectro 1/*f* era algo que aparecería para cualquier señal de audio registrada durante un intervalo suficientemente largo, como el requerido para interpretar una sinfonía entera o para las horas de trasmisión de música radiofónica que Voss y Clarke grabaron. Así, si uno analiza la señal sonora durante bastante tiempo, todas las músicas mostrarán un comportamiento espectral 1/*f.* Esto significa que el análisis de Voss y Clarke de largas piezas musicales no nos dice nada sobre el gusto musical humano, como ellos creían. Si vamos al otro extremo, y consideramos sonidos musicales sobre intervalos muy cortos de tiempo que abarcan hasta unas doce notas, entonces encontramos que hay fuertes correlaciones entre notas sucesivas, y los sonidos son muy predecibles y nada aleatorios. Esto sugiere que es en los intervalos de tiempo intermedios donde el espectro de la música será más interesante.

Boon y Oliver Decroly realizaron entonces una investigación como la de Voss y Clarke, pero limitada al rango «interesante» intermedio de intervalos temporales en el rango de frecuencias de 0,03 a 3 hertzios. Estudiaron 23 piezas diferentes de 28 compositores diferentes, de Bach a Cárter, promediando sólo sobre cada parte de cada pieza. No encontraron la más mínima prueba de un espectro 1/*f.* En su lugar, el espectro decaía como 1/*f* *a*, con *a* entre 1,79 y 1,97. Nettheim ha encontrado algo muy similar basado en un estudio de sólo cinco melodías (véase la Figura 5.15).

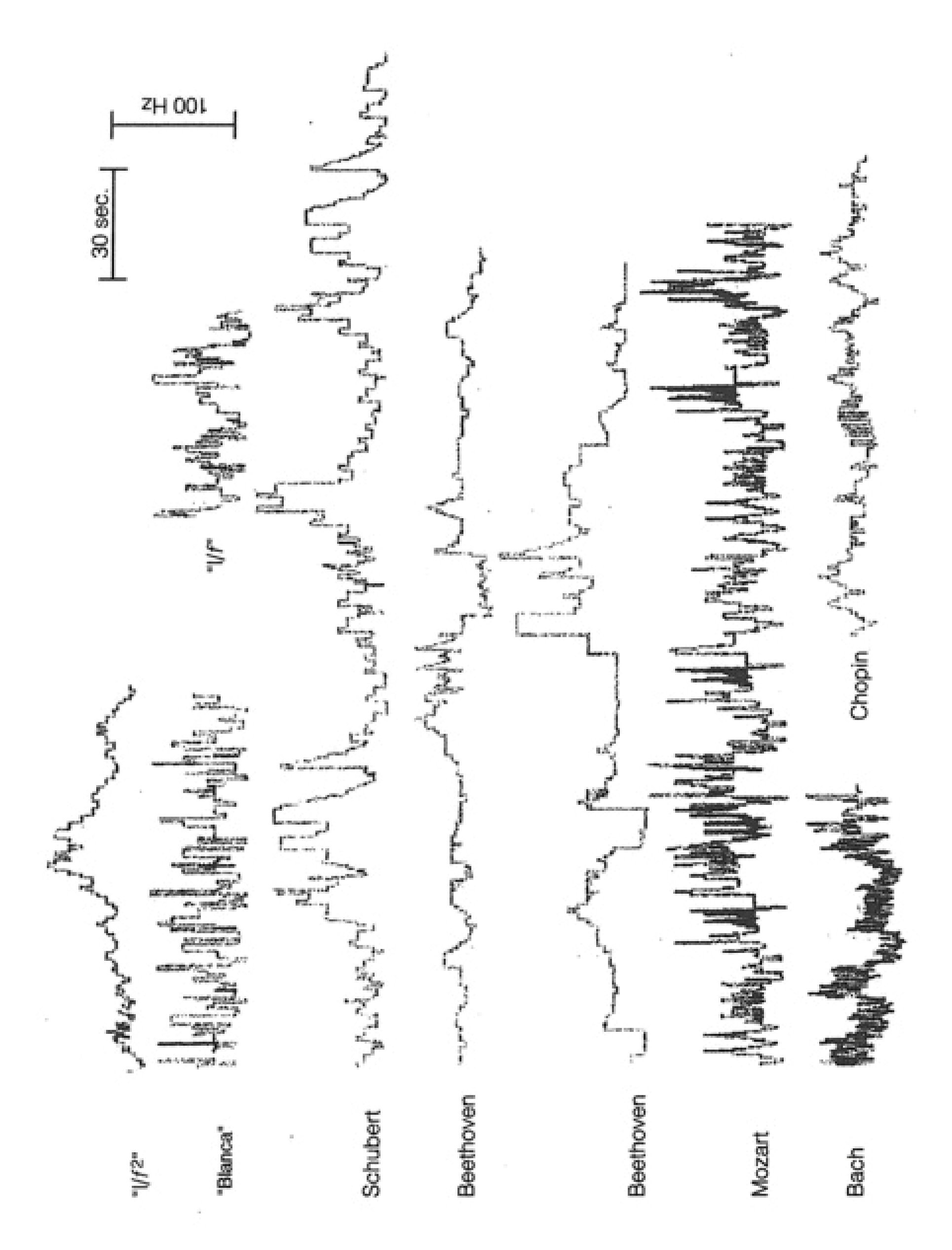


Figura 5.15. Representaciones espectrales de varias melodías cortas de compositores clásicos comparadas con espectros de ruido blanco y ruido 1/f. Las longitudes de los extractos son de 3 o 4 compases, la longitud de una frase musical típica, y se han tomado de un trabajo de Nigel Nettheim.

Este análisis sugiere que la música apreciada por los seres humanos está mucho más cerca del espectro del ruido marrón correlacionado (a = 2) que del ruido «rosa» 1/*f.* Hay intervalos de tiempo preferidos en las composiciones musicales y correlaciones particulares. Todas estas

investigaciones se limitaban a la música occidental. Sería interesante ver los resultados de un estudio de tradiciones musicales no occidentales sobre los mismos intervalos de tiempo.

Un filósofo como Immanuel Kant habría explicado nuestra afinidad por la música apelando a una armonía preestablecida entre la música y la constitución de la mente humana. Si fuera teletransportado al presente, Kant no se sorprendería al encontrar que hay vínculos entre las propiedades del sonido musical y los receptores sensoriales del cerebro. Pero mientras que Kant consideraría estos vínculos como inexplicables, nosotros hemos aprendido a buscar maneras en que la naturaleza del entorno puede imprimir poco a poco afinidades para ciertas pautas sonoras porque es ventajoso, y por ello adaptativo, hacerlo así. Sospechamos que la mente es especialmente sensible a estímulos que manifiestan formas espectrales características de ruido libre de escala. Una amplia gama de composiciones musicales, de una diversidad de culturas y tradiciones musicales, exhiben esta propiedad. Pero no habría que considerar esta observación y la especulación asociada como totalmente reduccionista, de la misma forma que no habría que tomar en serio las afirmaciones de los amantes de la música de que la música es una forma artística trascendental cuyo encanto está más allá de las palabras. Nuestras mentes, su propensión a analizar, distinguir y responder a sonidos de cierto tipo, pero ignorar otros, tienen historias. La apreciación musical no es un atributo que aumente nuestra adaptación al mundo: no amplía nuestras probabilidades de supervivencia. Si así fuera, encontraríamos que las capacidades musicales estarían extendidas entre otros miembros del mundo animal. La musicalidad parece explicarse más razonablemente como una elaboración de capacidades y susceptibilidades que habían evolucionado originalmente con otros propósitos más mundanos pero esencialmente acústicos. Nuestra aptitud para el procesamiento del sonido convergió a una sensibilidad instintiva óptima para ciertas pautas sonoras, porque su reconocimiento mejoraba la probabilidad global de supervivencia. Con el

desarrollo de una capacidad de procesamiento más elaborada, que llamamos conciencia, ha llegado la capacidad de explorar y explotar nuestra sensibilidad innata al sonido. Esto ha llevado a formas organizadas de sonido que exploran todo el rango de tonos e intensidades al que es sensible el oído humano. Dichas formas divergen en sus matices estilísticos de una cultura a otra, como lo hacen los adornos en los cuellos de las personas y en sus casas. Pero la universalidad de la apreciación musical, y el carácter espectral común de gran parte del sonido que disfrutamos, nos impulsa a mirar en los aspectos universales de la experiencia temprana en busca de una explicación. Si la Naturaleza de nuestro mundo nos hubiera permitido sobrevivir con un intervalo muy estrecho de sensibilidad a diferentes frecuencias sonoras, entonces nuestras probabilidades de generar música interesante habrían estado considerablemente restringidas. Si nuestros oídos hubieran sido sensibles solamente a cierto intervalo de frecuencias ultrasónicas que están más allá de nuestra capacidad actual de audición, entonces nuestra música se hubiera concentrado en este rango de frecuencias, y nuestros instrumentos —los aparatos que utilizamos para poblar ese reino del sonido musical— serían muy diferentes. Si los sonidos que llenan nuestro mundo hubieran sido diferentes en sus propiedades espectrales, entonces habrían sido necesarios diferentes poderes de discriminación para que respondiéramos a sonidos de peligro inminente o a utilizar el sonido para estimar distancias y tamaños, y necesitaríamos diferentes sensibilidades para el análisis espectral. El resultado habría sido una inclinación hacia sonidos con estructuras completamente diferentes —estructuras que desde nuestra perspectiva habrían sido más sorprendentes o más predecibles.

Capítulo 6
Bien está lo que bien acaba

No puede haber duda de que, si no fuera corregido en general, el error perceptual se manifestaría como una catástrofe biológica. El hombre que regularmente toma a su mujer por un sombrero (o, peor aún, a su sombrero por una mujer) está abocado a la extinción.
NICHOLAS HUMPHREY

Durante miles de años, la visión científica del mundo ha centrado la atención en las simplicidades y las regularidades de la Naturaleza. Se ha encontrado que dichas regularidades residen en las reglas que gobiernan los acontecimientos que vemos a nuestro alrededor, antes que en la estructura de los propios acontecimientos. El mundo está lleno de estructuras complejas y sucesos erráticos que son producto de un pequeño número de leyes simples y simétricas. Como hemos aprendido, esto es posible porque los productos de las leyes de la Naturaleza no tienen por qué poseer las propiedades de simetría de las propias leyes. Las leyes pueden ser las mismas en todas partes y en todos los lugares; sus productos no tienen por qué serlo. Así es como el Universo genera complejidad a partir de la simplicidad. Por eso podemos hablar de encontrar una Teoría de Todo y, sin embargo, no llegar a entender un copo de nieve.

Hasta muy recientemente las ciencias como la física hacían énfasis en la deducción y confirmación de las leyes y las regularidades del mundo. La enseñanza de la ciencia se estructuraba en torno a los problemas simples y resolubles que podían tratarse utilizando papel y lápiz. Esto ha cambiado desde principios de los años ochenta del siglo XX. La disponibilidad de

computadores pequeños, baratos y potentes con buenos sistemas gráficos interactivos ha hecho posible estudiar observacionalmente situaciones grandes, complejas y desordenadas. Se han inventado las matemáticas experimentales. El computador puede ser programado para simular la evolución de sistemas complicados y así estudiar, modificar y reproducir su comportamiento a largo plazo. Incluso se pueden construir realidades virtuales que obedecen leyes de la Naturaleza que no son las nuestras, y explorar simplemente. Gracias a estos medios, el estudio del caos y la complejidad se ha convertido en una rama de la ciencia. El estudio de los problemas simples y exactamente resolubles de la ciencia se ha ampliado gracias a una apreciación creciente de la enorme complejidad que cabe esperar en situaciones en donde hay muchas influencias competitivas en acción. Los principales candidatos son los sistemas que evolucionan en sus entornos por selección natural y, al hacerlo, modifican sus entornos de modos complejos. Un primer descubrimiento en salir a la luz de dichos estudios fue la ubicuidad del comportamiento caótico; es decir, comportamiento que muestra una delicada sensibilidad a cambios pequeños, de modo que cualquier ignorancia de su estado actual lleva a una completa ignorancia de su estado tras un corto período de tiempo. La predicción del tiempo atmosférico sufre este problema. Si no somos muy buenos prediciendo el tiempo que hará mañana es por nuestra ignorancia del estado del tiempo hoy, no porque no sepamos cómo cambian los sistemas climáticos. Conforme ha madurado nuestra apreciación de los matices del comportamiento caótico gracias a la exposición de ejemplos naturales, han surgido novedades. Se ha encontrado que caos y orden existen en una curiosa simbiosis. Imaginemos un reloj de arena muy grande en el que está cayendo arena, grano a grano, y formando una pila de arena cada vez mayor. La arena se distribuye de un modo errático. Se producen avalanchas de arena de todos los tamaños, cuyo efecto es mantener en equilibrio la pendiente global de la pila de arena, justo al borde del colapso. Este proceso

sostenido ha sido bautizado como «criticalidad autoorganizada» por su descubridor Per Bak. A nivel microscópico, el proceso es caótico. Si no hay nada peculiar en la arena, que haga las avalanchas de un tamaño más o menos probables que las de otro, entonces la frecuencia con que ocurren las avalanchas es proporcional a alguna potencia matemática de su tamaño. (Las avalanchas son procesos «libres de escala», igual que las fuentes de ruido que consideramos en el capítulo anterior cuando discutimos las pautas de los sonidos musicales). Hay muchos sistemas naturales, tales como los terremotos, y otros debidos al hombre, tales como los derrumbes de la bolsa, en los que se combina una concatenación de procesos locales para mantener de este modo un equilibrio aparente. Se desarrolla un orden a gran escala mediante la combinación de muchos sucesos caóticos a pequeña escala que se ciernen al borde de la inestabilidad. La pila de arena está siempre en una situación crítica y la próxima avalancha podría ser de cualquier tamaño, pero su efecto es mantener en la arena una pendiente global bien definida. El curso de la vida en la Tierra podría perfectamente describirse por dicha imagen. La cadena de las criaturas vivas mantiene un equilibrio global dictado por la segunda ley de la termodinámica, como vimos en el Capítulo 3, a pesar del impacto constante de extinciones, cambios de hábitat, enfermedades y desastres, que conspiran para crear «avalanchas» locales. Extinciones ocasionales abren nuevos nichos, y permiten que de nuevo florezca la diversidad, hasta que el equilibrio se reestablece temporalmente. Una imagen del mundo viviente en un estado crítico, en el que el caos local sustenta una estabilidad global, es el compromiso más sutil de la Naturaleza. Los sistemas adaptativos complejos prosperan en este terreno entre las inflexibilidades del determinismo y los caprichos del caos. Allí obtienen lo mejor de ambos mundos: del caos brota una riqueza de alternativas que son filtradas por la selección natural, mientras que el timón del determinismo fija un claro curso global.

Stephen Wolfram ha propuesto que existe un «Principio de Equivalencia Computacional» en el Universo según el cual tanto los procesos y estructuras naturales como los generados por el hombre tienen un nivel de complejidad similar cuando se ven como procesos computacionales. En cierto sentido, son todo lo complicados que pueden ser. El cerebro y las reglas de la aritmética pueden aparecer muy diferentes en términos de su complejidad, pero en el fondo tienen las mismas capacidades y las mismas impredecibilidades. Esto puede ofrecer una nueva idea sobre la extraordinaria utilidad de las matemáticas como descripción del mundo. En última instancia, esto es un reflejo de la abundancia de operaciones computables sencillas. No es un misterio que el Universo sea matemático; lo misterioso es que esas matemáticas simples sean de tan largo alcance y nos digan tanto del funcionamiento del Universo. Tampoco parece haber ninguna razón por la que nuestras capacidades mentales sean capaces de captar una parte tan importante de la estructura profunda del Universo. La mera supervivencia no lo necesitaba. La equivalencia computacional sugiere que hay un ajuste entre nuestras mentes y el ambiente que nos rodea que refleja la universalidad de la computación en el pensamiento y los procesos naturales. Esta idea provisional resuena con fuerza con uno de los mensajes principales de este libro. Las propensiones y sensibilidades de la mente humana han sido heredadas de la complejidad del entorno en el que ha evolucionado y se ha aclimatado. Somos reflejo de muchas de las características de las leyes de la Naturaleza y de la estructura del Universo que nos rodea.

Hemos introducido estas ideas para resaltar un cambio de perspectiva científica sobre el mundo. La ciencia ha puesto el acento durante largo tiempo en las regularidades y factores comunes que hay tras las apariencias. Búsqueda de «leyes», «invariancias», «constantes», «ecuaciones», «soluciones», «periodicidades» y «principios» —es la materia de la ciencia clásica. El patrón era el objeto. Coleccionar mariposas y plantas, listar todas las estrellas en el cielo, todo eso está muy bien. Pero no son actividades

científicas hasta que traten de dar sentido a lo que encuentran y separar el sentido del sinsentido prediciendo lo que deberían encontrar en el futuro. Esta búsqueda de orden y simplicidad bajo la hipótesis de leyes comunes que relacionan el presente con el futuro y el pasado ha dirigido el desarrollo de la ciencia durante los últimos trescientos años. Pero la complejidad no es tan simple. Sólo con la llegada de estudios de lo complejo, por medio de nuevas tecnologías, el ojo científico se ha vuelto hacia el problema de explicar la diversidad, la asimetría y la irregularidad.

Si pasamos de la perspectiva científica a la perspectiva artística sobre el mundo, encontramos un contraste interesante. Allí donde la ciencia ha progresado buscando pautas y factores comunes, las artes han celebrado la diversidad y se han resistido a los intentos por encerrar sus actividades en reglas y fórmulas. Son las últimas manifestaciones de las impredecibilidades y asimetrías de la Naturaleza. Después de todo ¿qué productos son más caóticamente impredecibles que algunos de los que salen de la mente humana? Tan intratable ha sido el problema de encontrar pautas en la actividad creativa que pocos lo buscarían siquiera. Si miramos no a la ciencia y el arte, sino a los científicos y los artistas, encontramos un reflejo de esta divisoria. Dos poblaciones que se solapan tan sólo un poco, pensadores convergentes y pensadores divergentes, especialistas y generalistas —estas etiquetas reflejan las diferencias de las que hablamos.

Nos queda por sacar una última lección. Aunque la ciencia ha ampliado sus horizontes pasados más allá del orden y la simetría para abarcar la diversidad y la impredecibilidad, las humanidades todavía tienen que apreciar toda la fuerza de lo común y la pauta como un factor unificador en la interpretación de la creatividad humana. Del mismo modo que la ciencia ha empezado a apreciar que su visión de la Naturaleza debe reconciliar simplicidad y complejidad, también las artes y las humanidades deben apreciar las lecciones a sacar de las regularidades de la Naturaleza. No es suficiente recoger ejemplos de diversidad: la coexistencia de la diversidad

con el comportamiento universal es lo que requiere exploración y reconciliación.

Ninguna mente fue nunca una *tabula rasa.* Entramos en el mundo con mentes que poseen una capacidad innata para aprender. Lo que aprendemos, cómo lo aprendemos, lo que advertimos y lo que sabemos pero nunca aprendimos —estas cosas guardan testimonio de nuestro pasado de maneras sutiles—. La creatividad no es tan desorganizada como parece. Nuestra humanidad deriva de experiencias compartidas en el pasado remoto, cuando muchos de nuestros instintos y propensiones fueron adquiridos como adaptaciones a un entorno universal que fija los problemas comunes a superar por nuestros ancestros. Nuestras mentes desarrollaron sensibilidades que ayudaron a la solución de dichos problemas. Muchos de éstos ya no son evidentes; por ello, algunos de nuestros sentidos y sensibilidades son adaptaciones a situaciones a las que ya no nos enfrentamos. Incluso pueden ser una dificultad. Aunque podemos reescribir estas respuestas heredadas con aprendizaje, siguen existiendo (a veces inadvertidas) para desencadenar nuestras emociones en ausencia de experiencia. A veces, incluso la aparición de racionalidad consciente es incapaz de desplazar a estos instintos innatos. La aparición repentina de una flor o la visión de un gran precipicio: estas experiencias conjuran instintos latentes, establecidos y perpetuados en los supervivientes durante millones de años.

No somos solucionadores de problemas globales. La historia de la especie humana ha seleccionado el desarrollo de formas específicas de análisis y respuesta. Muchas características de nuestro entorno, en el sentido más amplio de la palabra, han sido interiorizadas en nuestra imagen mental del mundo. Nuestras respuestas a dichas características han sido filtradas por la selección natural. A veces respondemos a indicadores, o símbolos, que sólo ofrecen ejemplos parciales de un aspecto potencialmente vital del entorno. En este libro hemos examinado algunas maneras en que el Universo nos ha impuesto aspectos de su estructura por la inevitabilidad de las leyes de la

Naturaleza, y hemos considerado la necesidad que tienen los seres vivos de adaptarse a sus entornos. En un mundo donde triunfan los adaptadores, pero fracasan los no adaptadores, esperamos encontrar vestigios de adaptaciones que en otro tiempo sirvieron a otros fines básicos. Muchas de estas adaptaciones son sutiles y han dado lugar a una serie de subproductos curiosos, algunos de los cuales han desempeñado un papel para determinar nuestro sentido estético. Somos productos de un mundo pasado donde las sensibilidades a ciertas cosas eran cuestión de vida o muerte.

En el pasado, las humanidades y las ciencias del comportamiento humano han estado dominadas por su celebración de la diversidad del comportamiento humano. Los antropólogos estaban encantados de encontrar nuevas costumbres, nuevos hábitos y prácticas diferentes en todo el mundo. Los factores comunes eran ignorados por ser poco interesantes. A veces se hacía demasiado fácil encontrar lo que se estaba buscando. Como sabe cualquier interrogador habilidoso, es fácil encontrar la verdad que uno busca; no inventándola, sino permitiendo la emergencia de sólo esa parte de la verdad total que uno quiere oír. Una perspectiva que viera el contexto, la cultura y el aprendizaje como los únicos determinantes del comportamiento humano hacía así progresos incuestionados. Por el contrario, en este libro nos hemos centrado en los factores comunes de la experiencia humana. Creemos que son potencialmente de mayor importancia que las diferencias y, como los científicos encontraron hace tiempo, mucho más fáciles de estudiar. Nos vinculan a las universalidades de los entornos antiguos en los que la evolución de la vida ocurrió durante enormes períodos de tiempo, mucho antes de la llegada de la civilización y la historia registrada, y nos ligan en última instancia a la estructura y origen del Universo. El estudio de las acciones humanas, la mente humana y la creatividad humana ha sido rápido en ver la complejidad, lento en apreciar la simplicidad. La ciencia, rápida en ver la uniformidad, ha empezado finalmente a apreciar la diversidad, pero las artes creativas tienen mucho que aprender de la unidad

del Universo sobre las propensiones de nuestros sentidos y las imágenes y los sonidos que los excitan. Y la ciencia, a su vez, descubrirá muchas cosas sobre la emergencia de estructuras organizadas complejas a partir de un estudio renovado de las invenciones más ingeniosas de la mente: un lugar donde se encuentran dos caminos.

Bibliografía

Entonces me di cuenta de que no es infrecuente que los libros hablen de libros: es como si hablaran entre ellos. A la luz de esta reflexión, la biblioteca me parecía más inquietante. Era el lugar de un murmullo de siglos, de un diálogo imperceptible entre un pergamino y otro, un ser vivo, un receptáculo de fuerzas no gobernadas por una mente humana, un tesoro de secretos emanados de muchas mentes, que sobrevivían a la muerte de quienes los habían producido o habían sido sus transmisores.

UMBERTO ECO

Capítulo 1. Cuentos de lo inesperado

- *Appleyard, B. (1992)* Understanding the Present: Science and the Soul of Modern Man*. Doubleday, Nueva York.*
- Dissanayake, E. (1988) *What is Art For?* University of Washington Press, Seattle.
- Kuhn, T. (1962) *The Structure of Scientific Revolutions.* University of Chicago Press. [Hay trad. cast.: *La estructura de las revoluciones científicas,* Fondo de Cultura Económica, Madrid, 1990].
- Shklovskii, I. S. y Sagan, C. (1967) *Intelligent Life in the Universe.* Dell, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Vida inteligente en el Universo,* Reverté, Barcelona, 1985].

Capítulo 2. El impacto de la evolución

- Una habitación con vistas. Cuestiones de perspectiva
- *Alpers, S. (1983)* The Art of Describing: Dutch Art in the Seventeenth Century*. University of Chicago Press.*
- Amheim, R. (1954) *Art and Visual Perception.* University of California Press, Berkeley.
- Gardner, H. (1982) *Art, Mind and Brain.* Basic Books, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Arte, mente y cerebro,* Paidós Ibérica, Barcelona, 2005].
- Gombrich, E. H. (1979a) *Art and Illusion.* Phaidon, Londres. [Hay trad. cast.: *Arte e ilusión,* Debate, Barcelona, 2003].
- Gombrich, E. H. (1979b) *The Sense of Order.* Phaidon, Londres. [Hay trad. cast.: *El sentido del orden,* Debate, Barcelona, 2004].
- Homer, W. I. (1964) *Seurat and the Science of Painting.* MIT Massachusetts.
- Humphrey, N. (1973) «The illusion of beauty». *Perception* 2, 429-39.
- *Ivins, W. (1946)* Art and Geometry: A Study in Space Intuitions*. Dover Books, Nueva York.*
- Kandinsky, W. (1979) *Point and Line to Plane.* Dover Books, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Punto y línea sobre el plano,* Paidós Ibérica, Barcelona, 1998].
- Richardson, J. A. (1971) *Modern Art and Scientific Thought.* University of Illinois Press, Urbana.
- *Shalin, L. (1991)* Art and Physics: Parallel Visions in Space*. Morrow, Nueva York.*
- Yee, C. (1938) *The Silent Traveller.* Country Life, Londres.
- Lavadores de cerebros. Distorsiones de pensamiento y espacio
- Barlow, H. (1961) «The coding of sensory messages». En *Current Problems in Animal Behaviour* (ed. W. Thorpe and O. Zangwill), pp. 331-360. Cambridge University Press.
- Barret, C. (1971) *An Introduction to Optical Art.* Studio Vista, Londres.

- Brush, S. (1987) «The nebular hypothesis and the evolutionary worldview». *History of Science* 25, pp. 246-278.
- Carraher, R. G. y Thurston, J. B. (1966) *Optical Illusions and the Visual Arts.* Reinhold/Studio Vista, Nueva York.
- *Emst, B. (1986)* The Eye Beguiled: Optical Illusions. *Taschen, Cologne.*
- James, W. (1892) *The Principles of Psychology*. Macmillan, Londres.
- *Kant, I. (1781)* The Critique of Pure Reason. En Encyclopedia Britannica Great Books*, Encyclopedia Britannica Inc., Chicago.*
- MacKay, D. M. (1957) «Moving visual images produced by regular stationary pattems», *Nature* 180, pp. 849-850.
- Necker, L. (1832) «Observations on some remarkable phenomena seen in Switzerland: and on an optical phenomenon which occurs when viewing a figure of a crystal or geometrical solid». *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science* 1, pp. 329-337.
- Richards, J. (1979) «The reception of a mathematical theory: non-Euclidean geometry in England 1868-1883». En *Natural Order: Historical Studies of Scientific Culture* (ed. R. Barnes and S. Saphin). Sage, Beverly Hills.
- *Richards, R. J. (1987)* Darwin and the Emergenge of Evolutionary Theories of Mind and Behavior*. University of Chicago Press.*
- Vitz, P. C. y Glimcher, A. B. (1984) *Modern Art and Modern Science.* Praeger, Nueva York.
- *Waddington, C. H. (1969)* Behind Appearance: A Study of the Relations between Painting and the Natural Sciences in this Century*. Edinburgh University Press.*
- Wade, N. (1978) «Op art and visual perception». *Perception* 7, pp. 21-46.

- Los herederos. Adaptación y evolución

- Bonnor, J. T. (1988) *The Evolution of Complexity by Means of Natural Selection.* Princeton University Press, Nueva Jersey.
- Dawkins, R. (1976) *The Selfish Gene.* Oxford University Press. [Hay trad. cast.: *El gen egoísta,* Salvat Ediciones, Barcelona, 2000].
- Dawkins, R. (1983) «Universal Darwinism». En *Evolution from Molecules to Men* (ed. D. S. Bendall), pp. 403-425. Oxford University Press.
- Dawkins, R. (1986) *The Blind Watchmaker.* Longman, Londres. [Hay trad. cast.: *El relojero ciego,* RBA Coleccionables, Barcelona, 1993].
- Gould, S. J. y Lewontin, R. (1979) «The spandrels of San Marco and the panglossian paradigm: a critique of the adaptationist programme». *Proceedings of the Royal Society* B205, pp. 581-598.
- Kauffman, S. (1991) *The Origins of Order.* Oxford University Press.
- Kimura, M. (1983) *The Neutral Theory of Molecular Evolution.* Cambridge University Press.
- Lewontin, R. C. (1978) *Adaptation.* Scientific American (Sept.), pp. 212-230.
- Lewontin, R. C. (1991) *The Doctrine of DNA.* Penguin Books, Harmonsworth.
- Maynard Smith, J. (1989) *Evolutionary Genetics.* Oxford University Press.
- Mayr, E. (1991) *One Long Argument: Charles Darwin and the Genesis of Modern Evolutionay Thought*. Harvard University Press, Massachusetts. [Hay trad. cast.: Una larga controversia: Darwin y el darwinismo, Crítica, Barcelona, 1992].
- *Penrose, R. (1989)* The Emperor’s New Mind: Concerning Computers, Minds and the Law of Physics*. Oxford University Press. [Hay trad. cast.:* La nueva mente del emperador*, Mondadori, Barcelona, 1999].*
- *Smith, C. U. M. (1976)* The Problem of Life: an Essay in the Origins of Biological Thought*. Macmillan, Londres.*

- Sober, E. (1981) «The evolution of rationality». *Synthèse* 46, pp. 95-120.
- Stenseth, N. C. y Maynard Smith, J. (1984) «Coevolution in ecosystems: Red Queen evolution or stasis?» *Evolution* 38, pp. 870-880.
- Van Valen, L. (1973) «A new evolutionaiy law». *Evolutionary Theory* 1, pp. 1-30.
- Williams, G. C. (1966) *Adaptation and Natural Selection.* Prometheus, Nueva York.
- Wilson, E. O. (1975) *Sociobiology: The New Synthesis.* Harvard University Press, Massachusetts. [Hay trad. cast.: *Sociobiología,* Omega, Barcelona, 1980].
- Después de Babel. Una digresión lingüística
- Bickerton, D. (1990) *Language and Species.* University of Chicago Press.
- Chomsky, N. (1972) *Language and Mind* (rev. edn.) Harcourt, Brace, Jovanovich, Nueva York. [Hay trad. cast.: *El lenguaje y el entendimiento,* Seix-Barral, Barcelona, 1986].
- Chomsky, N. (1975) *Reflections on Language.* Pantheon, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Reflexiones sobre el lenguaje,* Ariel, Barcelona, 1979].
- Chomsky, N. (1980) *Rules and Representations.* Columbia University Press, Nueva York.
- *Chomsky, N. (1986)* Knowledge of Language: Its Nature, Origin, and Use*. Praeger, Nueva York. [Hay trad. cast.:* El conocimiento del lenguaje: su naturaleza, origen y uso*, Alianza, Madrid, 1989].*
- Chomsky, N. (1991) «Linguistics and cognitive science: problems and mysteries». En *The Chomskyan Turn* (ed. A. Kasher), pp. 26-53. Blackwell, Cambridge, Massachusetts.
- Flavell, P. (1963) *The Developmental Psychology of Jean Piaget.* Van Nostrand, Princeton.

- Fry, R. (1920) *Vision and Design.* Meridian, Nueva York.
- Lennenberg, E. H. (1967) *Biological Foundations of Language.* Wiley, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Fundamentos biológicos del lenguaje,* Alianza, Madrid, 1985].
- Lieberman, P. «On the evolution of language: a unified view». *Cognition* 2, pp. 59-95.
- Pinker, S. (1994) *The Language Instinct: the New Science of Language and Mind.* Penguin Books, Harmonsworth. [Hay trad. cast.: *El instinto del lenguaje*, Alianza, Madrid, 2005].
- Pinker, S. y Bloom, P. (1990) «Natural language and natural selection». *Behavioural and Brain Sciences* 13, pp. 707-784.
- Steiner, G. (1992) *After Babel* (2.ª ed.). Oxford University Press. [Hay trad. cast.: *Después de Babel,* Fondo de Cultura Económica de España, Madrid, 1981].
- Una sensación de realidad. La evolución de las imágenes mentales
- Biederman, C. (1948) *Art as the Evolution of Visual Knowledge.* Red Wing, Minnesota.
- Churchland, P. M. (1979) *Scientific Realism and the Plasticity of Mind.* Cambridge University Press.
- Delbrück, M. (1986) *Mind From Matter.* Blackwell, Oxford. [Hay trad. cast.: *Mente y materia,* Alianza, Madrid, 1989].
- Laughlin, C. D. y D'Aquila, E. G. (1974) *Bioenergetic Structuralism.* Columbia University Press, Nueva York.
- Lorenz, K. (1962) «Kant's doctrine of a priori in the light of contemporary biology». En *Yearbook of the Society for General Systems Research,* Vol. VII, pp. 23-35. Society for General Systems Research, Nueva York. [Reimpresa también en R. I. Evans, *Konrad Lorenz: the Mand and his Ideas,* pp. 181-217. Harcourt, Brace, Iovanovich, Nueva York. Ambas son traducciones del original alemán, publicada inicialmente en 1941].

- Lorenz, K. (1978) *Behind the Mirror.* Harcourt, Brace, Iovanovich, Nueva York. [Hay trad. cast.: *La otra cara del espejo,* Círculo de Lectores, Madrid, 1990].
- Munz, P. (1993) *Philosophical Darwinism.* Routledge, Londres.
- O' Hear, A. (1987) «Has the theory of evolution any relevance to philosophy?» *Ratio* 29, pp. 16-35.
- *Plotkin, H. (1994)* The Nature of Knowledge; Concerning Adaptations, Instinct and the Evolution of Intelligence*. Penguin Books, Hardmonsworth.*
- Quine, W. V.O. (1969) «Epistemology naturalized». En *Ontological Relativity and Other Essays.* Columbia University Press, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Relatividad ontológica y otros ensayos,* Tecnos, Madrid, 1974].
- Quine, W. V.O. (1973) *Roots of Reference.* Open Court, Perú, Illinois. [Hay trad. cast.: *Las raíces de la referencia,* Alianza, Madrid, 1988].
- Riedl, R. (1984) *Biology of Knowledge: The Evolutionary Basis of Reason.* Wiley, Chichester. [Hay trad. cast.: *Biología del conocimiento*, Labor, Barcelona, 1983].
- Von Schilcher, E. y Tennant, N. (1984) *Philosophy, Evolution and Human Nature.* Routledge and Kegan Paul, Londres.
- *Wuketits, E. M. (1990)* Evolutionary Epistemology and Its Implications for Humankind. *State University of New York Press.*
- El cuidado y mantenimiento de un pequeño planeta. Ambientalismo cósmico
- Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. y Michel, H. V. (1980) «Extraterrestrial cause for the Cretaceous Tertiary extinction». *Science* 208, pp. 1095-1108.
- Alvarez, L. W., Kauffman, E. G., Surlyk, E., Alvarez, W., Asaro, F. y Michel, H. V. (1984) «Impact theory of mass extinctions and the invertebrate fossil record». *Science* 223, pp. 1135-1141.

- Barrow, J. D. (1984) *The Origin of the Universe,* Basic Books, Nueva York.
- Barrow, J. D. y Silk, J. (1993) *The Left Hand of the Creation: the Origin and Evolution of the Universe* (2nd edn.). Oxford University Press, [Primera edición publicada por Basic Books, Nueva York (1983)].
- *Piel. G. (1992)* Only One World: Our Own to Make and to Keep*. Freeman, Nueva York.*
- Raup, D. M. (1986) «Biological extinction in Earth history». *Science* 21, pp. 1528-1533
- Raup, D. M. (1987) «Mass extinction: a commentary». *Paleontology* 30, pp. 1-13. Sepkowski, J. J. (1988) «Extinctions of life». *Los Alamos Science* 16, pp. 36-49. Stanley, S. M. (1987) *Extinction.* Freeman, Nueva York.
- El arco iris de la gravedad. El tejido del mundo
- Barrow, J. D. (1988) *The World within the World.* Clarendon Press, Oxford.
- *Barrow, J. D. (1991)* Theories of Everything: the Quest for Ultimate Explanation. *Clarendon Press, Oxford. [Hay trad. cast.:* Teorías de Todo: hacia una explicación fundamental del Universo, *Crítica, Barcelona, 1994].*
- Davies, P. C.W. (Ed). (1989) *The New Physics.* Cambridge University Press.
- Dyson, F. (1971) «Energy in the Universe». *Scientific American* (Sept)., pp. 50-59.
- Fritzsch, H. (1983) *Quarks.* Simon and Schuster, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Los quarks, la materia prima de nuestro Universo,* Alianza, Madrid, 1994].
- Hawking, S. W. (1988) *A Brief History of Time.* Bantam Books, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Historia del tiempo,* Crítica, Barcelona, 2003].
- Pagels, H. (1985) *Perfect Symmetry,* Michael Joseph, Londres.

- Weinberg, S. (1983) *The Discovery of Subatomic Particles*. Freeman, Nueva York.
- Zee, A. (1986) *Fearful Symmetry: The Searchfor Beauty in Modern Physics.* Macmillan, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Temerosa simetría*, Ellago Ediciones S. L., Castellón de la Plana, 2005].
- Crónica de una muerte anunciada. De muerte e inmortalidad
- Bell, G. (1984) «Evolutionary and no evolutionary theories of senescence». *American Naturalist* 124, pp. 600-603.
- Crowe, M. J. (1986) *The Extraterrestrial Life Debate 1750-1900.* Oxford University Press.
- Davies, P. C. W. (1995) *Are we alone?* Penguin, Londres.
- *Dick, S. J. (1982)* Plurality of Worlds. The origins of extraterrestrial life debate from Democritus to Kant*. Cambridge University Press.*
- Drake, F. (1988) «The search for estraterrestrial life». *Los Alamos Science* 16, pp. 50-69.
- Fogg, M. J. (1987) «Temporal aspects of the interaction among the first galactic civilizations»: the «Interdict Hypothesis». *Icarus* 69, pp. 370-384.
- Lewis, C. S. (1938) *Out of the Silent Planet.* John Lane, Londres. [Hay trad. cast.: *Lejos del planeta silencioso,* Encuentro Ediciones S. A., Madrid, 1994].
- Lightman, A. (1993) *Einstein's Dreams.* Bloomsnury, Londres. [Hay trad. cast.: *Sueños de Einstein,* Tusquets, Barcelona, 1993].
- Medawar, P. (1981) «Old age and natural death». En *The Uniqueness of the Individual.* Dover Books, Nueva York.
- Williams, G. (1957) «Pleiotropy, natural selection, and the evolution of senescence». *Evolution* 11, pp. 398-411.
- El factor humano. Luz en la oscuridad
- Bronowsky, J. (1975) *Science and Human Values.* Harper and Row, Nueva York.

- Gould, S. J. (1985) «Mind and supermind». En *The Flamingo's Smile, Reflections in Natural History,* pp. 392-402. Norton, Nueva York. [Hay trad. cast.: *La sonrisa del flamenco. Reflexiones sobre Historia Natural*, Crítica, Barcelona, 2004].
- Harrison, E. R. (1985) *Darkness at Night.* Harvard University Press, Massachusetts.

- El mundo no es suficiente. La gran ilusión

- Barrow, J. D. (1992) *Pi in the Sky.* Oxford University Press, Oxford. [Hay trad. cast.: *La trama oculta del Universo,* Crítica, Barcelona, 2001].
- Barrow, J. D. (1998) *Impossibility.* Johnatan Cape, Londres, chap. 8.
- *Barrow, J. D. (2002)* The Constants of Nature: From Alpha to Omega. *Jonathan Cape, Londres. [Hay trad. cast.:* Las constantes de la Naturaleza: de Alfa a Omega*, Crítica, Barcelona, 2006].*
- Barrow, J. D. (2003) «Glitch!», *New Scientist* 178. N.º 2378, 7 de junio, pp. 44-45.
- Bostrom, N. http://www.simulation-argument.com y *New Scientist,* 27 de julio de 2002, p. 48.
- Davies, P. C. W. «A brief history of the multiverse», *New York Times,* 12 de abril de 2003.
- Handon, R. (2001) «How to live in a simulation», *Journal of Evolution and Technology* 7 (http://www.trashumanist.com).
- Harrison, E. R. (1993) «The natural selection of universes containing intelligent life», *Quart. Jl. Roy. Astron. Soc.* 36, p. 193.
- MacKay, D. (1974) *The Clockwork Image,* IVP, Londres.
- *Popper, K. (1950)* British Journal for the Philosophy of Science *1, 117 y 173.*
- Webb, J. K., Murphy, M., Flambaum, W., Barrow, J. D., Churchill, C., Prochaska, J. y Wolfe, A. (2001) «Further evidence for cosmological

evolution of fine structure constant», *Physical Review Letters* 87,091301.

- Wolfram, S. (2002) *A New Kind of Science,* Wolfram Inc., Illinois.

Capítulo 3. Tamaño, vida y paisaje

- Un balance delicado. Equilibrios en el Universo

- Barrow, J. D. y Tipler, F. J. (1986) *The Anthropic Cosmological Principle.* Clarendon Press, Oxford.
- Carr, B. J. y Rees, M. J. (1979) «The Anthropic Principle and the structure of the physical world», *Nature 278*, pp. 605-612.
- Davis, P. C. W. (1982) *Accidental Universe.* Cambridge University Press. [Hay trad. cast.: *El universo accidental,* Salvat Ediciones, Barcelona, 1989].
- Press, W. H. y Lightman, A. (1983) «Dependence of macrophysical phaenomena on the values of the fundamental constants». *Proceedings of the Royal Society* A310, pp. 323-356.
- Weiskopf, V. F. (1975) «Of atoms, mountains, and stars: a study in qualitative physics», *Science* 187, pp. 605-612.

- De ratones y hombres. La vida en la Tierra

- Alexander, R. McN. (1971) *Size and Shape.* Arnold, Londres.
- Alexander, R. McN. (1989) *Dynamics of Dinosaurs and Other Extinct Giants.* Columbia University Press, Nueva York.
- Barrow, J. D. (1993) Sizing up the Universe. *Focus* (Oct). pp. 70-73.
- Belloc, H. (1959) *The Waterbeetle.* En *Cautionary Verses* (ilustrado por B. T.B. Bentley). Knopf, Nueva York.
- Bonner, J. T. y McMahon, T. A. (1983) *On Size and Life.* Freeman, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Tamaño y vida,* Prensa Científica A. A., Barcelona, 1986].
- Greenhill, A. G. (1881) «Determination of the greatest height consistent with stability that a vertical pole or mast can be made, and

of the greatest height to wich a tree of given proportions can grow». *Proccedings of the Cambridge Philosophical Society* 4, pp. 65-73.

- Hildebrandt, S. y Tromba, A. (1985) *Mathematics and Optimal Form.* Freeman, Nueva York.
- Lietzke, M. H. (1956) «Relation between weight-lifting totals and body weight». *Science* 124, 486-7.
- Pennycuick, CJ. (1992) *Newton Rules Biology.* Oxford University Press, Nueva York.
- Thompson, D'A. (1917) *On Growth and Form.* Cambridge University Press. [Hay trad. cast.: *Sobre el crecimiento y la forma,* Hermann Blume, Madrid, 1980].
- Tóth, L. F. (1964) «What the bees know and what they do not know». *Bulletin of the American Mathematical Society* 70, pp. 468-481.
- El borde escarpado. Fractales vivientes
- Briggs, J. (1992) *Fractals: The Patterns of Chaos.* Simon and Schuster, Nueva York.
- Mandelbrot, B. (1972a) *Fractals: Form, Chance, and Dimensions.* Freeman, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Los objetos fractales: forma, azar y dimensión,* Tusquets, Barcelona, 1988].
- Mandelbrot, B. (1972b) *The Fractal Geometry of Nature.* Freeman, Nueva York. [Hay trad. cast.: *La geometría fractal de la Naturaleza,* Tusquets, Barcelona, 1997].
- Peitgen, H.-O. y Richter, RH. (1986) *The Beauty of Fractals.* Springer, Berlín.
- Acuerdos bilaterales. Apreciando curvas
- Barrow, J. D. (2003) *Art and Science-Les Liaisons Dangereuses!* En *Art and Complexity,* eds. J. Casty y A. Karlquist. Elsevier, Amsterdam, pp. 1-20.
- Birkhoff, G. (1993) *Aesthetics Measure.* Harvard University Press, Cambridge.

- Expresionismo fractal: el extraño caso de Jack el Goteador
- Taylor, R. P., Micolich, A. P. y Jonas, D. (1999) «Fractal Analysis of Pollock' s Drip Paintings», *Nature* 399, 422; (1999) «Fractal Expressionism», *Physics World* 12, 25; (2003) «The Construction of Pollock's Fractal Drip Paintings», *Leonardo* 35, p. 205.
- Guerra y Paz. Tamaño y cultura
- Bonner, J. T. (1965) *Size and Cycle.* Princeton University Press, New Jersey.
- Bonner, J. T. (1969) *The Scale of Nature.* Harper and Row, Nueva York.
- Bonner. J. T. (1980) *The Evolution of Culture in Animals.* Princeton University Press, Nueva Jersey.
- Bortz, W. M. (1985) «Physical exercise as a evolutionary force». *Journal of Human Evolution* 14, pp. 145-155.
- Carder, W. A. III (1984) *Size, Function and Life History.* Harvard University Press, Massachusetts.
- Haldane, J. B.S. (1928) *On being the right size.* En *Possible Worlds,* pp. 20-28. Harper, Nueva York.
- McNab, B. K. (1985) «Energetics, body size, and the limits to endothermy». *Journal of Zoology* (Londres) 199, pp. 1-29.
- Moog, M. (1948) «Gulliver was a bad biologist». *Scientific American* (nov). pp. 52-55.
- Pilbeam, D. y Gould, SJ. (1974) «Size and scaling in human evolution». *Science* 186, pp. 892-901.
- Swift, J. (1926) *Gulliwer's Travels.* Reimpresión de la 5.ª ed. (1710). Oxford University Press, Londres, 1919.
- Went, F. W. (1968) «The size of man». *American Scientist* 56, pp. 400-413.
- Lejos del mundanal ruido. El tamaño de las poblaciones

- Brown, J. H. y Maurer, B. A. (1989) «Macroecology: the division of food and space among species on continents». *Science* 243, pp. 1145-1150.
- Carling, T. E. (1991) «Carbon dioxide in the atmosphere: evidence of Cenozoic and Mesozoic paleosols». *American Journal of Science* 291, pp. 377-400.
- Colinvaux, P. (1978) *Why Big Fierce Animals are Rares: an Ecologist's Perspective*. Princeton University Press, Nueva Jersey.
- Damuth, J. (1981) «Population density and body size in mammals». *Nature* 290, pp. 699-700.
- Elton, C. (1927) *Animal Ecology.* Macmillan, Nueva York.
- Farlow, J. O. (1987) «Speculations about the diet and digestive physiology of herbivorous dinosaurs». *Paleobiology* 13, pp. 60-72.
- Farlow, J. O. (1993) «On the rareness of big, fierce animals: speculations about the body sizes, population densities, and geographic ranges of predatory mammals and large camivorous dinosaurs». *American Journal of Science* 293A, pp. 167-199.
- Janis, C. M. y Carrano, M. (1994) «Scaling of reproductive turnover in archosaurs and mammals: why are large terrestrial mammals so rare?» En Kurten Memorial Volume (ed. B. M. Fortelius, L. Werdelin y A. Forsten). *Acta Zoologica Fennica.*
- May, R. (1984) En *Diversity of Insect Faunas,* pp. 188-204 (ed. L. A. Mound y N. Waloff). Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Peters, R. H. (1983) *The Ecological Implications of Body Size.* Cambridge University Press.
- Randall, J. E. (1975) «Size of the Great White Shark (Carcharodon)» *Science* 181, pp. 169-170.
- Spotila, J. R., O'Connor, M. P., Dodson, P. y Paladino, F. V. (1991) «Hot and cold running dinosaurs: body size, metabolism and migration». *Modern Geology* 16, pp. 203-227.

- Van Valkenburgh, B. (1988) «Trophic diversity in past and present guilds of large predatory mammals». *Paleobiology* 14, pp. 155-173.
- Les liaisons dangereuses. Complejidad, movilidad y evolución cultural
- Bonner. J. T. (1988) *The Evolution of Complexity*. Princeton University Press, Nueva Jersey.
- Bonner. J. T. (1989) *The Evolution of Culture in Animals.* Princeton University Press, Nueva Jersey.
- DeBrul, E. L. (1962) «The general phenomenon of bipedalism». *American Zoologist* 2, pp. 205-208.
- Hebb, D. O. (1955) «The mammal and his environment». *American Journal of Psychology* 3, pp. 826-831.
- Hewes, G. W. (1961) «Food transportation and the origins of bipedalism». *American Anthropologist* 63, pp. 687-710.
- *Konner, M. (1982)* The Tangled Wing: Biological Constraint on the Human Spirit. *Penguin Books, Harmondsworth.*
- Tooby, J. y Cosmides, L. (1990) «The past explains the present: emotional adaptations and the structure of ancestral environments». *Ethology and Sociobiology* 11, pp. 375-424.
- Cadena de noticias. Ramificación
- Banavar, J. R., Maritan, A. y Rinaldo, A. (1999) «Size and form in efficient transport networks», *Nature* 399, pp. 130-132.
- Banavar, J. R., Damuth, J., Maritan, A. y Rinaldo, A. (2002) «Supply-demand balance and metabolic scaling». *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, pp. 10 506-10 509.
- Schmidt-Nielsen, K. (1984) *Why is Animal Size so Important?* Cambridge University Press.
- West, G. B., Brown, J. H. y Enquist, B. J. (1997) «A general model for the origin of allometric scaling laws in biology». *Science* 276, pp. 122-126.

- West, G. B., Brown, J. H. y Enquist, B. J. (1999a) «The fourth dimensión and life: fractal geometry and allometric scaling of organosms». *Science* 284, pp. 1677-1679.
- West, G. B., Brown, J. H. y Enquist, B. J. (1997) «A general model for the structure of plant vascular systems». *Nature* 400, pp. 644-647.
- Los mediadores. Pasando el tiempo con el señor intermedio
- Brace, C. L. (1964) «The fate of Nearderthals: a consideration of hominid catastrophism». *Current Antrhopology* 5, pp. 3-43.
- Clutton-Brock. T. H. y Harvey, R (1981) «Primate home range size and metabolic needs». *Ecology and Sociobiology* 8, pp. 151-155.
- Foley, R. (1987) *Another Unique Species.* Longman, Londres.
- Isaac, G. (1971) «The diet of early Man: aspects of archeological evidence from Lower and Middle Pleistocene sites in Africa». *World Archaelogy* 2, pp. 278-298.
- Issac, G. y Crader, D. (1981) «To what extent were early hominid camivorous? An archaelogical perspective». En *Omnivorous Primates* (ed. R. S. Harding and G. Teleki), pp. 37-103. Columbia University Press, Nueva York.
- Jerison, H. J. (1973) *Evolution of the Brain and Intelligence.* Academic Press, Nueva York.
- McHenry, M. (1982) «The pattern of human evolution: studies on bipedalosm, mastication and encephalization». *Annual Review of Anhropology* 11, pp. 151-173.
- Newman, R. W. (1971) «Why man is a sweaty and thisty naked animal: a speculative review». *Human Biology* 42, pp. 12-27.
- Pfeiffer, J. E. (1982) *The Emergence of Culture.* Harper, Nueva York.
- Los rivales. La evolución de la cooperación
- Axelrod, R. (1984) *The Evolution of Cooperation.* Penguin Books, Harmonsworth.

- Axelrod, R. y Hamilton, W. D. (1981) «The evolution of cooperation». *Science* 211, pp. 1390-1396.
- Hamilton, W. D. (1964) «The genetical evolution of social behaviour». *Journal of Theoretical Biology* 7, pp. 1-52.
- *Lieberman, P. (1991)* Uniquely Human: the Evolution of Speech, Thought and Selfless Behaviour. *Harvard University Press, Massachusetts.*
- Maynard Smith, J. (1978) «The evolution of behaviour». *Scientific American* (Sept). pp. 176-193.
- Maynard Smith, J. (1982) *Evolution and the Theory of Games.* Cambridge University Press.
- Tooby, J. y Cosmides, L. (1992) «Cognitive adaptations for social exchange». En *The Adapted Mind* (ed. J. H. Barkow, L. Cosmides y J. Tooby), pp. 163-228. Oxford University Press, Nueva York.
- Trivers, R. L. (1971) «The evolution of reciprocal altruism». *Quarterly Review of Biology* 46, pp. 35-57.
- Trivers, R. L. (1981) *Social Evolution.* Benjamin-Cummings, Nueva York.
- El jardín secreto. El arte del paisaje
- Appleton, J. (1975) *The Experience of Landscape.* Wiley, Nueva York.
- Appleton, J. (ed). (1980) *The Aesthetics of Landscape.* Rural Planning Services, Didcot, Oxfordshire.
- Appleton, J. (1984) «Prospects and refuges revisited». *The Landscape Journal* 3, pp. 91-103.
- Appleton, J. (1990) *The Symbolism of Habitat.* University of Washington Press, Seattle.
- Balling, J. D. y Falk, J. H. (1982) «Development of visual preference for natural environments». *Environment and Behaviour* 14, pp. 5-28.
- Hilden, O. (1965) «Habitat selection in birds». *Annales Zoologici Fennici* 2, pp. 53-75.

- Jenkins, I. (1958) *Art and the Human Enterprise.* Harvard University Press, Massachusetts.
- Orians, G. H. (1980) «Habitat selection: general theory and applications to human behaviour». En *Evolution of Human Social Behaviour* (ed. J. Lockard), pp. 49-66. Elsevier, Nueva York.
- Orians, G. H. (1986) «An ecological and evolutionary approach to landscape aesthetics». En *Landscape Meanings and Values* (ed. E. Penning-Rowsell y D. Lowenthal), pp. 3-35, Allen and Unwin, Londres.
- Orians, G. H. y Heerwagen, J. H. (1992) En *The Adapted Mind* (ed. J. H. Barkow, L. Cosmides y J. Tooby), pp. 555-79. Oxford University Press, Nueva York.
- Tuan, Y. (1979) *Landscapes of Fear*. Pantheon, Nueva York.
- Ulrich, R. (1979) «Visual landscapes and psychological well-being». *Landscape Research* 4, 7-23.
- Wilson, E. O. (1984) *Biophilia.* Harvard University Press, Massachusetts.
- Figuras en un paisaje. El dilema del arte por ordenador
- Ascher, M. (1991) *Ethnomathematics.* Brooks/Cole, Pacific Grove, California.
- Audsley, W. (1968) *Designs and Patterns from Historic Ornaments*. Dover Books, Nueva York.
- Birkhoff, G. (1933) *Aesthetic Measure.* Harvard University Press, Massachusetts.
- Burke, E. (1757) *A Philosophical Enquiry into the Origin of Our Ideas of the Sublime and Beautiful*. Edición revisada (ed. J. T. Boulton) Blackwell, Oxford (1987).
- Coxeter, H. S.M., Emmer, M., Penrose, R. y Teuber, M. N. (1986) *M. C. Escher Art and Science.* Elsevier, Amsterdam.
- Critchlow, K. (1984) *Islamic Patterns: An Analytical Approach.* Thames and Hudson, Londres.

- Entsminger, G. (1989) «Stochastic Fiction: fiction from fractals». *Micro Cornucopia* (Sept./Oct.), pp. 49, 96.
- *Escher, M. C. (1961)* The Graphic Work of M. C. Escher Introduced and Explained by the Artist*. Pan Books.*
- Field, M. y Golubitsky, M. (1991) *Symmetry in Chaos.* Oxford University Press.
- Franke, H. W. (1971) *Computer Graphics, Computer Art.* Phaidon, Londres.
- Grünbaum, B. y Shephard, G. C. (1987) *Tilings and Patterns.* Freeman, Nueva York.
- *Kappraff, J. (1991)* Connections: the Geometric Bridge between Ant and Science. *McGraw-Hill, Nueva York.*
- Latham, W. y Todd, S. (1967) *Evolutionary Art.* Academic Press, Nueva York.
- *Mueller, R. E. (1967)* The Science of Art: The Cybernetics of Creative Communication*. Rapp and Whiting, Londres.*
- Mueller, R. E. (1972) «Idols of Computer art». *Art in America* (mayo/junio), pp. 68-73.
- Mueller, R. (1983) «When is Computer art art?» *Creative Computing* (January), pp. 136-144.
- Schaaf, W. L. (1951) «Art and mathematics: a brief guide to source materials». *American Mathematical Monthly* 58, pp. 167-177.
- *Stevens, P. (1981)* A Handbook of Regular Patterns: An Introduction to Symmetry in Two Dimensions*. MIT Press, Massachusetts.*
- Vanderplas, J. M. y Garvin, E. A. (1959) «The association value of random shapes». *Journal of Experimental Psychology* 57, pp. 147-154.
- Vitz, P. C. (1966) «Preference for different amounts of visual complexity». *Behavioural Science* 2, pp. 105-114.

- Washbum, D. K. y Crowe, D. W. (1989) *Symmetries of Culture: Theory and Practice of Plane Pattern Analysis.* University of Washington Press, Seattle.
- Hijos de la medianoche. Una primera ojeada a las estrellas
- Aveni, A. (1980) *Skywatchers of Ancient Mexico.* University of Texas Press, Austin.
- Santayana, G. (1955) *The Sense of Beauty.* Dover Books, Nueva York (publicado originalmente en 1896). [Hay trad. cast.: *El sentido de la belleza*, Tecnos, Madrid, 1999].

Capítulo 4. Los cielos y la tierra

- Lo que queda del día. Ritmos de vida
- *Aveni, A. (1990)* Empires of Time: Calendars, Clocks, and Cultures*. Tauris, Londres.*
- Brown, E. (1962) *Biological Clocks.* Heath, Englewood, Nueva Jersey.
- Cazenave, A. (ed). (1986) *Earth Rotation: Solved and Unsolved Problems*. Reidel, Dordrecht.
- Saunders, D. (1977) *An Introduction to Biological Rhythms.* Wiley, Nueva York.
- *Young, M. (1988)* The Metronomic Society: Natural Rhythms and Human Timetables*. Harvard University Press, Massachusetts.*
- Winfree, A. T. (1987) *The Timing of Biological Clocks.* Freeman, Nueva York.
- El Imperio del Sol. Las razones de las estaciones
- Farhi, E. y Guth, A. (1987) «An obstacle to creating a universe in the laboratory». *Physics Letters* B183, pp. 149-155.
- Harriron, E. R. (1995) «The natural selection of universes containing intelligent life». *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 36, p. 193.
- Kandel, R. S. (1980) *Earth and Cosmos.* Pergamon Press, Oxford.

- Paley, W. (1802) *Natural Theology.* En *The Works of William Paley* (ed. R. Lynam). Londres (1825)
- Shu, F. (1982) *The Physical Universe.* University Science Books: Mill Valley, California.
- Wallace, A. R. (1903) *Man's Place in the Universe.* Chapman & Hall, Londres.
- Wylie, F. E. (1979) *Tides and the Pull of the Moon.* Green Press, Brattleboro, Vermont.
- Planetas extrasolares. Un caso de prejuicio espacial
- La *Extrasolar Planets Encyclopedia* es accesible on line en http://www.obspm. fr/encycl/encycl.html
- Un puñado de polvo. La Tierra debajo
- Anderson, D. L. (1991) *Theory of Earth.* Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Barrow, J. D. (1987) «Observational limits on the time-evolution of extra spatial dimensions». *Physical Review* D35, pp. 1805-1810.
- Cook, A. (1979) «Geophysics and the human condition». *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 20, pp. 229-240.
- Diamond, J. (1991) *The Rise and Fall of the Third Chimpanzee.* Vintage Books, Londres. [Hay trad. cast.: *El tercer chimpancé,* Espasa-Calpe S. A., Madrid, 1994].
- Dott, R. H. y Batten, R. L. (1988) *Evolution of the Earth* (4.ª ed.). McGraw-Hill, Nueva York.
- Grossman, L. y Larimer, J. W. (1974) «Early chemical history of the solar system». *Reviews of Geophysics and Space Physics* 12, pp. 71-101.
- Maurette, M. (1976) «The Oklo Reactor». *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science* 26, pp. 319-350.

- Mian, Z. (1993) «Understanding why Earth is a planet with plate tectonics». *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 34, pp. 441-448.
- Pollard, W. G. (1979) «The prevalence of Earthlike planets». *American Scientist* 67, pp. 653-659.
- Teske, R. (1993) «Planetary resources for extraterrestrial technology are unlikely». *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 34, pp. 335-336.
- Un guijarro en el cielo. La Luna arriba
- Hartman, W. K. (1983) *Moon and Planets.* Wadsworth, Belmont.
- *Krupp, E. (1983)* Echoes of the Ancient Skies: the Astronomy of Lost Civilizations*. Harper and Row, Nueva York.*
- Marshack, A. (1972) *The Roots of Civilization.* McGraw-Hill, Nueva York. Ringwood, A. E. (1979) *The Origin of the Earth and the Moon.* Springer, Berlín.
- Tinieblas a mediodía. Eclipses
- Asimov, I. (1941) *Nightfall and Other Stories.* Doubleday, Nueva York. [El relato «Nightfall» apareció por primera vez en el número de septiembre de la revista de ciencia-ficción *Astounding,* cuya cubierta le estaba dedicada]. [Hay trad. cast.: *Anochecer*, Plaza y Janés, Barcelona, 1999].
- Berendzen, R., Hart, R. y Seeley, D. (1976) *Man Discovers the Galaxies.* Neale Watson Academic, Nueva York.
- Brewer, B. B. (1991) *Eclipse* (2.ª ed.) Earth View, Seattle.
- McCrea, W. H. (1972) «Astronomer's luck». *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* 13, pp. 506-519.
- Rescher, N. (1985) «Extraterrestrial science». En *Extraterrestrials, Science and Alien Intelligence* (ed. E. Regis), pp. 83-116. Cambridge University Press.

- Will, C. M. (1981) *Theory and Experiment in Gravitation Physics.* Cambridge University Press.
- Zirker, J. B. (1984) *Total Eclipse of the Sun.* Van Nostrand, Nueva York.
- El molino de Hamlet. La errante Estrella Polar
- Aveni, A. (1981) «Tropical archeoastronomy». *Science* 213, pp. 161-171.
- Krupp, E. (1991) *Beyond the Blue Horizon.* Oxford University Press, Nueva York.
- Santillana, G. de y H. von Dechend (1969) *Hamlet's Mill.* Gambit, Nueva York.
- Unsold, A. (1977) *The New Cosmos* (2nd. edn., trans. R. C. Smith). Springer, Nueva York.
- Luna de papel. Controlando los planetas caóticos
- Imbrie, J. y K. P. (1979) *Ice Ages: Solving the Mystery.* Harvard University Press, Massachusetts.
- *Lambeck, K. (1980)* The Earth's Variable Rotation: Geophysical Causes and Consequences*. Cambridge University Press.*
- Laskar, J. y Robutel, P. (1993) «The chaotic obliquity of the planets». *Nature* 361, pp. 608-612.
- Laskar, J., Joutel, F. y Boudin, F. (1993) «Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon», *Nature* 361, pp. 615-617.
- Ward, W. R. (1982) *Icarus* 50, pp. 444-448.
- Marte en sus ojos. Vinieron del espacio exterior
- Catling, D. «Planet Mars in Popular Culture», http://briefme.com/archive. php/article/6738
- Lowell, P. (1895) *Mars.* Texto completo on line en http://www.fourmilab. ch/etexts/www/warworlds/warw.html
- El hombre que fue Jueves. Los orígenes de la semana
- Achelis, E. (1955) *Of Time and the Calendar.* Hermitage, Nueva York.

- Anon. (1931) «The continous working week in Soviet Russia». *International Labor Review* 23, pp. 157-180.
- *Burnaby, S. B. (1901)* Elements of the Jewish and Mohammedan Calendars*. George Bell, Londres.*
- Chamberlain, W. H. (1931) *The Soviet Planned Economic Order.* World Peace Foundation, Boston.
- Colson, F. H. (1926) *The Week.* Cambridge University Press.
- Cotton, P. (1926) *From Sabbath to Sunday.* Times Books, Bethlehem, Pennsylvania.
- *Cumont, F. (1960)* Astrology and Religion Among the Greeks and Romans*. Dover Books, Nueva York.*
- Dio Cassius (1905) *Dio's Roman History.* Pafraets, Nueva York. [Hay edición española de la *Historia Romana* de Dión Casio, Gredos, Madrid].
- Duran, D. (1971) *Book of the Gods and Rites and the Ancient Calendar.* University of Oklahoma Press, Norman.
- Fagerlund, V. G. y Smith, R. H.T. (1970) A preliminary map of market periodicities in Ghana. *Journal of Developing Areas* 7, pp. 333-347.
- Fleet, J. F. (1912) «The use of planetary names of the days of the week in India». *Journal of the Royal Asiatic Society (new series)* 44, pp. 1039-1046.
- Gandz, S. (1948) «The origin of the planetary week or the planetary week in Hebrew literature». *Proceedings of the American Academy for Jewish Research* 18, pp. 213-254.
- Gruliow, L. (1953) «Significant Russian approval». *Journal of Calendar Reform* 23, pp. 101-105.
- Hare, J. C. (1832) «On the names of the days of the week». *The Philological Museum* 1, pp. 1-73.
- Long, C. H. (1963) *Alpha: The Myths of Creation.* George Braziller, Nueva York.

- Meek, TJ. (1914) «The Sabbath in the Old Testament». *Journal of Biblical Literature* 33, pp. 201-212.
- Neugebauer, O. (1962) *The Exact Sciences in Antiquity.* Harper, Nueva York.
- Parry, A. (1940) «The Soviet calendar». *Journal of Calendar Reform* 10, pp. 63-69.
- Sachs, A. (1952) «Babylonian horoscopes». *Journal of Cuneiform Studies* 6, pp. 49-75.
- Strutynski, U. (1975) «Germanic divinities in weekday names». *Journal of Indo-European Studies* 3, pp. 363-384.
- Sydenham, M. J. (1974) *The First French Republic, 1792-1805.* Batsford, Londres.
- Thomas, N. W. (1924) «The week in West Africa». *Journal of the Royal Anthropological Institute* 54, pp. 183-209.
- Van der Waerden, B. L. (1968) «The date of invention of Babylonian planetary theory». *Archive for History of Exact Sciences* 5, pp. 70-78.
- Zerubavel, E. (1977) «The French Republican calendar: a case study in the sociology of time». *American Sociological Review* 42, pp. 868-876.
- *Zerubavel, E. (1985)* The Seven Day Circle: The History and Meaning of the Week*. Free Press, Nueva York.*
- Larga jornada hacia la noche. El origen de las constelaciones
- Bauval, R. y Gilbert, A. (1994) *The Orion Mystery.* Heinemann, Londres. [Hay trad. cast.: *El misterio de Orión,* Publicaciones y Ediciones Salamandra S. A., Barcelona, 1995].
- *Brown, R. (1899/1900)* Reserches into the Origin of the Primitive Constellations of the Greeks, Phoenicians and Babylonians *(2 vols.) Williams and Norgate, Londres.*
- Crommelin, A. C.D. (1923) «The ancient constellation figures». En *Splendour of the Heavens.* vol. 2 (ed. T. E.R. Phillips y W. H. Steavenson). Hutchinson, Londres.

- Gurstein, A. (1993) «On the origin of the zodiacal constellations», *Vistas in Astronomy* 36, pp. 171-190.
- Gurstein, A. (1994) «Dating the origin of the constellations by precession». *Soviet Physics Doklady,* 39, pp. 575-578.
- Gurstein, A. (1995a) «Prehistory of zodiac dating: three strata of Upper Paleolithic constellations», *Vistas in Astronomy* 39, pp. 347-362.
- Gurstein, A. (1995b) «The great pyramids of Egypt as sanctuaries commemorating the origin of the zodiac: an analysis of astronomical evidence». *Soviet Physics Doklady* 41, pp. 228-232.
- Gurstein, A. (1997a) «In search of the first constellations». *Sky and Telescope,* June, pp. 46-50.
- Gurstein, A. (1977b) «The Origins of the constellations», *American Scientist* 85(3), pp. 264-73 y 500-501.
- Gurstein, A. (1977c) «The evolution of the zodiac in the context of ancient oriental history». *Vistas in Astronomy* 41, pp. 507-525.
- Higgins, R. (1973) *The Archaelogy of Minoan Crete.* Bodley Head, Londres.
- Krupp, E. C. (1994) «Celestial reptiles». *Sky and Telescope* (April), pp. 64-65.
- Mair, G. R. (1921) *Aratus' Phaenomena* (tras). Loeb Classical Library, Heinemann, Londres. [Hay edición española de los *Fenómenos,* Gredos, 1993].
- Maunder, E. W. (1909) *The Astronomy of the Bible.* Hodder and Stoughton, Londres.
- Ovenden, M. W. (1966) «The origin of the constellations». *Philosophical Journal* 3, pp. 1-18.
- Roy, A. (1984) «The origin of the constellations». *Vistas in Astronomy* 27, pp. 171-197.
- Swartz, C. (1809) *Le Zodiaque expliquè,* 2nd. edn. Migneret and Desenne, Paris, traducido del sueco; 1.ª edición 1807. Esto está

catalogado como el ítem 5 en el volumen 47 de la colección *Bound Pamphlets* de la Biblioteca de la Royal Astronomical Society en Burlington House, Londres.

- Estudio en escarlata. Las fuentes de la visión del color
- Berlin, B., y Kay, P. (1969) *Basic Color Terms.* University of California Press, Berkeley.
- Bohren, C. F. (1988) «Understanding colors in Nature». *Pigment Cell Research* 1, pp. 214-222.
- Borstein, M. H. (1974) «The influence of visual perception on culture». *American Anthropologist* 77, pp. 774-798.
- Boston, R. (1978) «Black, white, and red all over: the riddle of color term salience». *Ethnology* 17, pp. 287-311.
- Fox, H. M. y Vevers, G. (1960) *The Nature of Animal Colours.* Sedgwick and Jackson, Londres.
- Gage, J. (1995) «Colour and Culture», in *Colour: Art & Science,* eds. T. Lamb y J. Bourriau, Cambridge UP, pp. 175-193.
- *Gage, J. (1999)* Colour and Meaning: Art, Science and Symbolism*. Thames and Hudson, Londres.*
- Govardovskii, V. I. (1976) «Comments on the sensitivity hypothesis». *Vision Research* 16, pp. 1363-1364.
- Humphrey, N. (1983a) *Consciousness Regained.* Oxford University Press.
- Humphrey, N. (1983b) *A History of Mind.* Vintage, Londres.
- Jacobs, G. H. (1981) *Comparative Color Vision.* Academic Press, Nueva York.
- Kandinsky, W. (1977) *Concerning the Spiritual in Art* (trans. M. Sadler). Dover Books, Nueva York. [Publicado originalmente en 1912]. [Hay trad. cast.: *De lo espiritual en el arte,* Paidós Ibérica S. A., Barcelona, 1998].

- Kay, P. (1975) «Synchronic variability and diachronic change in basis colour terms». *Language in Society* 4, pp. 257-270.
- Kay, P. y McDaniel, C. K. (1978) «The linguistic significance of the meaning of basic color terms». *Language* 54, pp. 610-646.
- Lyons, J. (1995) «Colour in language». En *Colour: Art & Science* (eds. T. Lamb y J. Bourriau). Cambridge University Press, pp. 194-224.
- Lythgoe, J. N. (1979) *The Ecology of Vision.* Oxford University Press.
- Ratliff, F. (1976) «On the psychophysical base of color names». *Proceedings of the American Philological Society* 120, pp. 311-330.
- Ray, V. F. (1952) «Techniques and problems in the study of human color perception». *Journal of Anthropology* 8, pp. 251-259.
- Roach, R. E. y Gordon, J. L. (1973) *The Light of the Night Sky.* Reidel, Dordrecht.
- Sahlins, M. (1976) «Colors and culture». *Semiotica* 16, pp. 1-22.
- Shephard, R. N. (1992) En *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture* (ed. J. H. Barkow, L. Cosmides y J. Tooby). Oxford University Press, Nueva York.
- Sobel, M. I. (1987) *Light.* University of Chicago Press.
- Witkowski, S. R. y Brown, C. H. (1977) «An explanation of color nomencalture universals». *American Anthropologist* 79, pp. 50-57.
- Witkowski, S. R. y Brown, C. H. (1978) «Lexical universals». *Annual Review of Anthropology* 7, pp. 427-451.
- Salida al exterior. La marcha del mundo
- Barrow, J. D. (2002) *The Constants of Nature: from alpha to omega*. Jonathan Cape, Londres. [Hay trad. cast.: *Las constantes de la Naturaleza: de Alfa a Omega*, Crítica, Barcelona, 2006].
- *Barrow, J. D. (2003)* The Infinite Book: a short guide to the boundless, timeless and endless*. Jonathan Cape, Londres.*

Capítulo 5. La historia natural del ruido

- El club de los oficios raros. Paisajes sonoros
- *Darwin, C. (1872)* The Expression of Emotions in Man and Animals*. Murray, Londres. [Hay trad. cast.:* La expresión de las emociones en los animales y en el hombre*, Alianza, Madrid, 1998].*
- Lomax, A. (1962) «Song structure and social structure». *Ethnology* 1, pp. 425-451.
- Needham, R. (1967) «Percussion and transition». *Man* 2, pp. 606-614.
- Roederer, J. G. (1984) «The search for survival value in music». *Music Perception* 1, pp. 350-356.
- Roederer, J. G. (1987) «Why do we music? A search for the survival value of music». En *Music in Medicine* (ed. R. Spintge and R. Droh). Springer, Heidelberg.
- Sebeok, T. A. (1981) *The Play of Musement,* ch. 9. Indiana University Press, Bloomington.
- *Sloboda, J. A. (1985)* The Musical Mind: The Cognitive Psychology of Music*. Clarendon Press, Oxford.*
- Sloboda, J. A. (Ed). (1988) *Music and the Mind.* Harper Collins, Nueva York.
- Thorpe, W. H. (1966) «Ritualization in the individual development of bird song». En J. Huxley (ed). «A discussion of ritualization of behaviour in animals and Man». *Philosophical Transactions of the Royal Society* B772, pp. 351-358.
- *Thorpe, W. H. (1972)* Duetting and Antiphonal Song in Birds: Its Extent and Significance*. E. J. Brill, Leiden.*
- Tuzin, D. (1984) «Miraculous voices: the auditory experience of numinous objects». *Current Anthropology* 25, pp. 579-596.
- Von Frisch, K. (1974) *Animal Architecture.* Harcourt, Brace, Jovanovich, Nueva York y Londres.
- Sentido y sensibilidad. Cuestión de coordinación

- *Edelman, G. (1992)* Bright Air, Brilliant Fire: On the Matter of the Mind*. Basic Books, Nueva York.*
- *Nettl, B. (1983)* The Study of Ethnomusicology: Twenty-nine Issues and Concepts*. University of Illinois, Urbana.*
- Turner, F. y Pöppel, E. (1983) «The neural lyre: poetic meter, the brain, and time». *Poetry* 142, pp. 277-309.
- Música incidental. ¿Un subproducto inocuo?
- Cooke, D. (1959) *The Language of Music.* Oxford University Press.
- Fry, R. (1924) *The Artist and Psychoanalysis.* Hogarth Presss, Londres.
- Gardner, H. (1983) *Frames of Mind.* Basic Books, Nueva York.
- Hanslick, E. (1957) *The Beautiful in Music* (trans. G. Cohen). Liberal Arts Press, Indianapolis.
- Hesse, H. (1969) *The Glass Bead Game; Magister Ludi.* Holt, Rinehart and Winston, Nueva York.
- Meyer, L. B. (1956) *Emotion and Meaning in Music.* University of Chicago Press.
- Tolstoy, L. (1960) *What is Art?* (trans. A. Mande). Liberal Arts Press, Indianapolis. [Hay trad. cast.: *¿Qué es el arte?,* Alba, Madrid, 1997].
- Weber, M. (1969) *The Rational and Social Foundations of Music.* Southern Illinois University Press, Carbondale.
- El juego de abalorios. La música de las esferas
- Buckert, W. (1972) *Lore and Science in Ancient Pythagorearism.* Harvard University Press, Massachusetts.
- Gorman, P. (1979) *Pythagoras: A Life.* Routjedge, Londres. [Hay trad. cast.: *Pitágoras*, Crítica, Barcelona, 1988].
- *Hunt, F. V. (1978)* Origins in Acoustics: The Sciences of Sound from Antiquity to the Age of Newton*. Yale University Press, New Haven.*
- *James, J. (1993)* The Music of the Spheres-Music, Science and the Natural Order of the Universe*. Abacus, Londres.*
- Philip, J. A. (1966) *Pythagoras.* University of Toronto Press.

- Schroeder, M. (1986) *Number Theory in Science and Communication* (2.ª ed.). Springer, Nueva York.
- Zuckerkandl, V. (1956) *Sound and Symbol* (Vol. 2). Pantheon, Nueva York.

- El pianista. Oyendo por números

- *Barrow, J. D. (1992)* Pi in the Sky: Counting, Thinking, and Being*. Oxford University Press. [Hay trad. cast.:* La trama oculta del Universo: contar, pensar y existir*, Crítica, Barcelona, 2001.*
- Butterworth, B. (1999) *The Mathematical Brain.* Macmillan, Londres.
- *Dehaene, S. (1997)* The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics*. OUP, Nueva York.*
- Dodge, C. y Jerse, T. A. (1985) *Computer Music.* Schirmer, Nueva York.
- Eigen, M. y Winkler, R. (1983) *Laws of the Game,* ch. 18. Penguin Books, Londres.
- *Emest, P. (1998)* Social Constructivism as a Philosophy of Mathematics*. State University of New York.*
- *Gardner, H. (1983)* Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences*. Basic Books, Nueva York.*
- Harwood, D. L. (1976) «Universals in music: a perspective from cognitive psychology». *Ethnomusicology* 20, pp. 521-533.
- Hersh, R. (1998) *What is Mathematics Really?* Vintage, Londres.
- MacLane, S. (1986) *Mathematics: Form and Function.* Springer-Verlag, Nueva York.
- Maddy, R (1992) *Realism in Mathematics.* Oxford University Press, Nueva York.
- Mathews, M. V. y Pierce, J. R. (eds). *Current Directions in Computer Music Research.* MIT Press, Massachusetts.
- Pickover, C. (1990) *Computer, Pattern, Chaos and Beauty.* Sutton, Nueva York.

- Pickover, C. (1992) *Mazes for the Mind.* St Martin's Press, Nueva York.
- Repp, B. (1990) «Pattems of expresive timing in performances of a Beethoven minuet by 19 famous pianists». *Journal of the Acoustical Society of America* 88, 622-41.
- Road, C. (ed.) *Composers and the Computer.* Kaufman, California.
- El sonido del silencio. Descomponiendo música
- Boden, M. (1990) *The Creative Mind: Myths and Mechanisms.* Weidenfeld and Nicholson, Londres. [Hay trad. cast.: *La mente creativa: mitos y mecanismos*, Gedisa, Barcelona, 1994].
- Deutsch, D. (1984) «Musical space». En *Cognitive Processes in the Perception of Art* (ed. W. R. Crozier y A. J. Chapman), pp. 253-287. Elsevier, Nueva York.
- Longuet-Higuins, H. C. (1962a) «Letter to a musical friend». *Music Review* 23, pp. 244-248.
- Longuet-Higgins, H. C. (1962b) «Second letter to a musical friend». *Music Review* 23, pp. 271-280.
- Longuet-Higuins, H. C. (1976) «The perception of melodies». *Nature* 263, pp. 646-653.
- Longuet-Higuins, H. C. (1978) «The perception of music». *Interdisciplinary Science Reviews* 3, pp. 148-156.
- Longuet-Higuins, H. C. (1994) «Artificial Intelligence and musical cognition». *Philosophical Transactions of the Royal Society London* A349, pp. 103-113.
- Steerman, M. (1994) «The well-tempered Computer». *Philosophical Transactions of the Royal Society London* A349, pp. 115-131.
- El juego de imitación. Languideces
- *Barrow, J. D. (1991)* Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation*. Clarendon Press, Oxford. [Hay trad. cast.:* Teorías del Todo: hacia una explicación fundamental del Universo*, Crítica, Barcelona, 2004].*

- *Barrow, J. D. (1992)* Pi in the Sky Counting, Thinking, and Being*. Clarendon Press, Oxford. [Hay trad. cast.:* La trama oculta del Universo: contar, pensar y existir*, Crítica, Barcelona, 2001].*
- Chaitin, G. (1988) «Randomness in arithmetic». *Scientific American* (July), pp. 80-85.
- Hofstadter, D. (1985) *Metamagical Themas.* Basic Books, Nueva York.
- Myhill, J. (1952) «Some philosophical implications of mathematical logic». *Reviews of Metaphysics* 6, pp. 165-198.
- El sonido de la música. Oír y escuchar
- Ackerman, D. (1991) *A Natural History of the Senses.* Vintage, Nueva York.
- Benade, A. H. (1976) *Fundamentals of Musical Acoustics.* Oxford University Press, Nueva York.
- Moles, A. (1966) *Information Theory and Esthetic Perception.* University of Illinois, Urbana. [Hay trad. cast.: *Teoría de la información y percepción estética,* Ediciones Júcar, Gijón, 1976].
- Parncutt, R. (1989) *Harmony: A Psychoacoustical Approach.* Springer, Nueva York.
- Pierce, J. R. (1992) *The Science of Musical Sound* (2nd. edn.). Freeman, Nueva York. (Primera edición publicada en la Scientific American Library, 1983). [Hay trad. cast.: *Los sonidos de la música,* Prensa Científica S. A., Barcelona, 1990].
- Plomp, R. (1976) *Aspects of Tone Sensation.* Academic Press, Nueva York.
- Ridgen, J. S. (1985) *Physics and the Sound of Music.* Wiley, Nueva York.
- Rossing, T. D. (1989) *The Science of Sound* (2.ª ed.). Addison Weslwy, Reading, Massachusetts.
- Sabine, W. C. (1964) *Collected Papers.* Dover Books, Nueva York.

- Schafer, R. M. (1969) *The New Soundscape.* BMI Canada Ltd., Don Mills, Ontario.
- Sundberg, J. (1987) *The Science of the Singing Voice.* Nortswestern Illinois University Press, DeKalb, Illinois.
- Aventuras de Roderick Random. Ruido blanco, ruido rosa y ruido negro
- Bolognesi, T. (1983) «Automatic composition: experiments with self-similar music». *Computer Music Journal* 7(1), pp. 25-36.
- Boon, J. P. y Decroly, O. (1995) «Dynamical Systems theory for music dynamics». *Chaos* 5, pp. 501-508.
- Boon, J. P., Noullez, A. y Mommen, C. (1990) «Complex dynamics and musical structures». *Interface: Journal of New Music Research* 19, pp. 3-14.
- Campbell, P. (1986) «The music of digital computers». *Nature* 324, pp. 523-528.
- Dogge, C. y Bahn, C. R. (1986) «Musical fractals», *Byte,* June pp. 185-196.
- Gardner, M. (1978) White and brown music, fractal curves and one-over-/ fluctuations. *Scientific American* 238 (abril), pp. 16-32.
- Hiller, L. A. y Isaacson, L. M. (1959) *Experimental Music.* McGraw-Hill, Nueva York.
- Hsü, K. J. y Hsü, A. J. (1990) «Fractal geometry of music». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 87, pp. 938-941.
- Hsü, K. J., y Hsü, A. J. (1991) «Self-similarity of the "1/f noise" called music». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 88, pp. 3507-3509.
- Klimontovich, Y. L. y Noon, J. P. (1987) «Natural flicker noise ("1/*f*") in music». *Europhys. Lett.* 3, p. 395
- Knuth, D. (1984) «The complexity of songs». *Communications ACM* 27, pp. 344-346.

- Montroll, E. W., y Shlesinger, M. F. «On 1/*f* noise and other distributions with long tails». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 79, pp. 3380-3383.
- Nettheim, N. «On the spectral analysis of melody». Interface: *Journal of New Music Research*, 21, pp. 135-148 (http://users. bigpond.net. au/nettheim/specmel/specmel.htm)
- Schroeder, M. R. (1987) «Is there such a thing as fractal music?» *Nature* 325, pp. 765-766.
- Schroeder, M. R. (1991) *Fractals, Chaos, Power Laws.* Freeman, Nueva York.
- *Schockley, W. (1957)* Proceedings of the Institution of Radio Enginners 45*, pp. 279-290.*
- Voss, R. V. (1979) «1/*f* (flicker) noise: a brief review». En *Proceedings of the 33rd Annual Symposium on Frequency Control,* pp. 40-46. Atlantic City.
- Voss, R. V. y Clarke, J. (1975) «1/*f* noise in music and speech». *Nature* 258, pp. 317-318.
- Voss, R. V. y Clarke, J. (1978) «1/*f* noise in music: music from 1/*f* noise». *Journal of the Acoustical Society of America* 63, pp. 258-263.
- Xenakis, I. (1971) *Formalized Music.* Indiana University Press, Bloomington.

Capítulo 6. Bien está lo que bien acaba

- Arnheim, R. (1988) «Universals in the arts». *Journal of Social and Biological Structures* 11, pp. 60-65.
- Bak, P. (1991) «Self-organising criticality». *Scientific American* (Jan). pp. 46-53.
- Bak, R, Tang, C. y Wiesenfeld, K. (1988) «Self-organised criticality». *Physical Review* A38, p. 364.

- Berlyne, D. E. (1971) *Aesthetics and Psychobiology.* Appleton-Century-Croft, Nueva York.
- Brown, D. E. (1991) *Human Universals.* Temple University Press, Filadelfia.
- *Casti, J. (1994)* Complexification: Explaining a Paradoxical World through the Science of Surprise*. Harper Collins, Nueva York.*
- Ehrenzweig, A. (1967) *The Hidden Order of Art.* University of California Press, Berkeley.
- Gleick, J. (1987) *Chaos: Making a New Science.* Viking, Nueva York. [Hay trad. cast.: *Caos: la creación de una ciencia,* Seix-Barral, Barcelona, 1998].
- *Levy, S. (1992)* Artificial Life: The Quest for a New Creation*. Jonathan Cape, Londres.*
- *Maquet, J. (1986)* The Aesthetic Experience: An Anthropologist Looks at the Visual Arts*. Yale University Press, New Haven.*
- Morse, P. (1965) *Man's Rage for Chaos.* Chilton, Filadelfia.
- Tooby, J. y Cosmides, L. (1990) «On the universality of human nature and the uniqueness of the individual». *Journal of Personality* 58, pp. 17-67.
- Watts, H. A. (1980) *Chance: A Perspective on Dada.* University of Michigan Research Press, Ann Arbor.

Créditos de las ilustraciones

Figuras

2.2. Con el permiso del Syndics of Cambridge University Library.

2.3. © Succession Picasso/DACS 2005.

2.5. © Tate, Londres 2004; Bridget Riley 2005, todos los derechos reservados.

2.7. Boats at Berck-sur-Mer. Óleo sobre tela, 1873, 34 × 55,8 cm. Édouard Manet, 1832-1883. © The Cleveland Museum of Art. Adquisición de la Fundación J. H. Wade, 1940 534.

2.8. The National Portrait Gallery, Londres.

2.9. De J. D. Barrow, *The Constants of Nature,* Jonathan Cape (2002), p. 123, basado en la información de la figura 8.1 de P. D. Ward y D. Brownlee, *Rare Earth,* Copernicus (2000), p. 165.

3.3. © Getty Images.

3.4.(i) Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart. (i-v) De S. Huldebrandt y A. Tromba, *Mathematics and Optimal Form,* Scientific American Library; © 1985, Scientific American Books Inc.

3.5. (i) De Julius H. Comroe (1966) «The lung», *Scientific American,* 214 (febrero), pp. 56-58; con el permiso de Jeanette W. Comroe. (ii) De Manfred Schroeder, *Fractals, Chaos, Power Laws,* W. H. Freeman, 1991. (iii) © Jacky Phillips.

3.6 - 3.10.De G. Birkhoff, *Aesthetic Measure,* Harvard University Press, 1933, con algunos cambios.

3.11. Con el permiso del Syndics of Cambridge University Library.

3.12. Adaptado de P. Went. «The size of Man», *American Scientist,* 56, p. 406.

3.13. Basado en los datos de R. May «The dynamics and diversity of insect faunas», en *Diversity of Insect Faunas,* Symposia of the Royal Entomological

Society of London n.º 9 (ed. L. Mound y N. Waloff), Blackwell Scientific Publications, 1978, pp. 188-204.

3.14. Basado en la información de M. Taube, *Evolution of Matter and Energy,* Springer, 1985, p. 194.

3.15. Datos obtenidos de H. T. Odum, «Ecology and the atomic age», *Assocociation of South Eastern Biologists Bulletin,* 4, 1957, pp. 27-29

3.16, 3.17, 3.21. De T. A. McMahon y J. T. Bonner, *On Size and Life,* Scientific American Library, pp. 228, 235; © 1983 Thomas A. McMahon y John Tyler Bonner.

3.18. De J. O. Farlow, «The number of exant and extinct large predators versus body weight», *American Journal of Science,* 293A, 1993, p. 169.

3.19. Basado en J. T. Bonner, *The Evolution of Complexity by Means of Natural Selection,* 1988, p. 225, © Princeton University Press. Reproducido con el permiso de Princeton University Press.

3.19a. Basado en K. Schmidt-Nielsen, *Scaling: Why is Animal Size so Important?,* Cambridge University Press, 1984.

3.23, 3.24. Adaptado de R. Foley, *Another Unique Species: Patterns in Human Evolutionary Ecology,* Longman Scientific and Technical, Harlow, Essex, 1987, pp. 98 y 146.

3.25. (i) Dr. P. Ealey, Royal Parks. (ii) © British Museum. (iii) Lord Leicester y los miembros del consejo de Holkham Estate.

3.26. (i) Con el permiso del Syndics of Cambridge University Library. (ii) The Bodleian Library, University of Oxford. 300 311s2.

3.27. (i) © Tate, Londres 2004. (ii) Lang Art Gallery, Newcastle Upon Tyne, Inglaterra (Tyne and Wear Museums). (iii) Staaliche Museen zu Berlin/ Preussischer Kulturbesitz Nationalgalarie.

3.28. © Jacky Phillips.

3.29.(i), (ii) © 2004, The M. C. Escher Company, Baarn, Holanda. Todos los derechos reservados.

3.32, 3.33. Adaptado de M. Ascher, *A Multicultural View of Mathematical Ideas,* Brooks/Cole Publishing Co., 1991, p. 158.

3.28, 3.29. De George D. Birkhoff, *Aesthetic Measure,* ilustraciones VIII-XVII, Harvard University Press; © 1933, the President and Fellows of Harvard College, © 1961, Garrett Birkhoff.

4.1. Adaptado de J. Diamond, *The Rise and Fall of the Third Chimpanzee,* Vintage, 1992, p. 222.

4.3. Basado en un diagrama del Grifíith Observatory.

4.4, 4.5. De Alexander Marshack, *The Roots of Civilization,* Weindenfeld and Nicolson, Londres, del Orion Publishing Group, 1972, p. 23.

4.6. De Anthony F. Aveni, Skywatchers: *A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico*; © 2001 Courtesy of University of Texas Press.

4.7. De *Herblock's Here and Now;* Simon and Schuster, 1955.

4.10. Adaptado de R. S. Kandel, *Earth and Cosmos,* Pergamon, 1980, p. 125.

4.11. De A. Unsold, *The New Cosmos* (2 ed.), Springer, 1977, p. 6.

4.12. Michael T. McDermott.

4.13. De Anthony F. Aveni, *Skywatchers: A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico;* © 2001, Cortesy of University of Texas Press. Illustrations by Peter Durham.

4.14. De J. Laskar y P. Robutel, «The chaotic obliquity of the planets», *Nature,* 361, 1993, p. 611; © 1993, Macmillan Magazines Ltd.

4.15, 4.16. Adaptado de J. Lakar, artículo en *Pour la Science,* agosto de 1993, p. 16.

4.18. Tom Lynham, «New Sky at Night», *The Observer,* 17 de julio de 1994.

4.19, 4.20. Basado en A. Roy, *Vistas in Astronomy,* 27,1984, pp. 172-173, figs. 1 y 2.

4.21. De A. Roy, *Vistas in Astronomy,* 27, 1984, p. 174, figs. 4 y 5.

4.22. De M. Ovenden, «The origin of the constellations», *The Philosophical Journal,* 3 (1) (enero), 1966, p. 7; con el permiso de la Royal Philosophical Society of Glasgow.

4.23. Royal Astronomical Society.

4.24. Adaptado de A. Roy, *Vistas in Astronomy,* 27, 1984, p. 184, fig. 9.

4.25. Adaptado de R. N. Shepard, *The Adapted Mind* (ed. H. H. Barkow, L. Cosmides y J. Tooby), Oxford University Press, 1992, fig. 13.2.

4.26. Datos obtenidos de W. N. McFarland y F. W. Munz en el verano de 1970 en Einewetok Atol. De J. N. Lythgoe, *The Ecology of Vision,* Oxford University Press, 1979, p. 5, fig. 1.2.

4.27. Basado en J. N. Lythgoe, *The Ecology of Vision*, Oxford University Press, 1979, p. 82, fig. 3.1; y G. Wyszecki y W. Stiles, *Colour Science,* Wiley, Nueva York.

4.29. De R. N. Shepard, en *The Adapted Mind* (ed. J. H. Barkow, L. Cosmides y J. Tooby), Oxford University Press, 1992, fig. 13.1 (b).

5.1. De Thomas A. Sebeok, *The Play of Musement,* Indiana University Press, 1981, p. 225.

5.2.(a) De J. A. Hawkins, *General History of the Science and Practice of Music*, 1835, vol. 1; Dover, 1963.

5.3. Alien Musical Score, © 1992, R. Mueller. De Clifford Pickover, *Mazes for the Mind,* St. Martin's Press, Nueva York, 1992.

5.4. Basado en H. C. Longuet-Higgins, «The perception of music», *Interdisciplinary Science Reviews,* 3, 1978, pp. 148-156.

5.5, 5.7. Adaptado de R. Murray Schafer, *The New Soundscape,* BMI Canada Ltd., 1969, pp. 26-27.

5.8, 5.9. De J. Pierce, *The Science of Musical Sound*, 1983, p. 152; © 1983, Scientific American Books.

5.10, 5.11. Adaptado de Manfred Schroeder, *Fractals, Chaos, Power Laws,* pp. 111, 123, 218; © 1991, W. H. Freeman and Company.

5.12, 5.13, 5.14. De R. F. Voss y J. Clarke, «1/*f* noise in music: music from 1/*f* noise», *Journal of Acoustical Society of America,* 63, 1978, pp. 259-263.

5.15. Basado en N. Netthe, *Interface: Journal ofNew Music Research,* 21, 1992, pp. 135-148.

Tablas

3.1. Datos de J. O. Farlow, *American Journal of Science,* 293A, 1993, p. 179; y de R. M. Nowak y L. Paradiso, *Walker's Mammals of the World*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1983[4].

4.1. Información de *The Planets,* Open University Press, Milton Keynes, 1994.

4.2. Información de F. H. Colson, *This Week,* Cambridge University Press, 1926; y E. Zerubavel, *The Seven Day Circle: The History and Meaning of the Week,* Free Press, Nueva York, 1985.

4.4. Información de B. Berlin y P. Kay, *Basic Colour Terms,* University of California Press, Berkeley, 1969.

Láminas

1. Scala, Florencia/HIP/The British Museum.
2. Capilla Brancacci, Florencia, Florence/www.bridgeman.co.uk
3. Palacio Ducal, Urbino/Scala, Florencia, cortesía del Ministero Beni e att. Culturali.
4. Art Institute of Chicago/www.bridgeman.co.uk
5. The National Gallery, Londres/www.bridgeman.co.uk
6. © Anglo-Australian Observatory, fotografía de David Malin.
7. © Getty Images.
8. © ImageState.
9. Christie's Images, Londres/www.bridgeman.co.uk
10. © Getty Images.
11. Richard Voss.
12. © Getty Images.

13. © E. K. Thompson/Aquila Wildlife Images.
14. © A. Cardwell/Aquila Wildfile Images.
15. © M. Gilroy/Aquila Wildlife Images.
16. © Getty Images.
17. Przemyslaw Prusinkiewicz.
18. Mapa *C6C2 Hemisphae Alis Coeli Sphaerigra*, con el permiso de la British Library.
19. Mapa *Col 2096 Haemisphaemium Australe,* con el permiso de la British Library.
20. Ryoichiro Debuchi, High Tech Lab. Tapan Inc. 1991.
21. De Karl von Frisch, *Animal Architecture,* Harcourt, Brace, Jovanovich, Nueva York y Londres, 1974, il. 99. Fotografía © Dr Max Renner, Múnich.
22. The National Gallery of Australia, Canberra. © ARS, NY y DACS, Londres, 2005.
23. Cortesía de R. Taylor.